



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y DISEÑO DIGITAL

CARRERA DE TELEMÁTICA

Trabajo de investigación Curricular
previa la obtención del Grado
Académico de Ingeniero en
Telemática.

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

**“MODELAMIENTO DE CELDAS EN COMUNICACIONES MÓVILES PARA LA
OPTIMIZACIÓN EN REDES DE QUINTA GENERACIÓN”**

AUTOR:

WILMER STEVEEN ZAMBRANO LOOR

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

ING. DIEGO FERNANDO INTRIAGO RODRÍGUEZ, MSc.

QUEVEDO – LOS RÍOS – ECUADOR

2025



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **WILMER STEVEEN ZAMBRANO LOOR**, declaro que la investigación aquí descrita es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

WILMER STEVEEN ZAMBRANO LOOR

C.I: 0929037562



CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, MSc.** Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante **Wilmer Steven Zambrano Loor**, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado “**Modelamiento de celdas en comunicaciones móviles para la optimización en redes de quinta generación**”, previo a la obtención del título de **Ingeniero en Telemática**, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.



Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

El suscrito, **Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, MSc.**, mediante el presente cumpla en presentar a usted, el informe de proyecto de Investigación titulado “**Modelamiento de celdas en comunicaciones móviles para la optimización en redes de quinta generación.**” Presentado por el estudiante **Wilmer Steven Zambrano Loor** egresado de la **Carrera de Telemática**, que fue revisado bajo mi dirección según resolución del Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Computación y Diseño Digital, que se ha desarrollado de acuerdo al Reglamento de la Unidad de Integración Curricular de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y cumple con el requerimiento de análisis del sistema COMPILATIO el cual avala los niveles de originalidad en 98% y similitud 2% del trabajo investigativo. Valido este documento para que el estudiante siga con los trámites pertinentes, de acuerdo como lo establece el Reglamento.

INFORME DE ANÁLISIS
magister

Proyecto Titulación - Wilmer
Zambrano Loor

< 1%
Textos
sospechosos

2% Similitudes
< 1 % similitudes entre comillas
(ignorado)
< 1 % entre las fuentes
mencionadas (ignorado)
0% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: Proyecto Titulación - Wilmer Zambrano Loor.pdf
ID del documento: bddd033439fd41f05ea20ad746b5b939e264fc88
Tamaño del documento original: 3,09 MB

Depositante: DIEGO FERNANDO INTRIAGO RODRIGUEZ
Fecha de depósito: 17/11/2025
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 17/11/2025

Número de palabras: 21.438
Número de caracteres: 154.107


Ing. Diego Fernando Intriago Rodríguez, MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y DISEÑO DIGITAL

CARRERA DE TELEMÁTICA

PROYECTO DE INVESTIGACION

TÍTULO:

“Modelamiento de celdas en comunicaciones móviles para la optimización en redes de quinta generación.”

Presentado al Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Computación y Diseño Digital, como requisito previo a la obtención del título de Ingeniero en Telemática.

Aprobado por:



PRESIDENTA DEL TRIBUNAL

Ing. Paola Maribel Benítez Navarrete, MSc.



MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Anthony Limber Moran Cabezas, MSc.



MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Daisy Judith Nata Castro, MSc.

QUEVEDO – LOS RIOS – ECUADOR

2025

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios por ser mi guía y mi fortaleza en cada paso de este camino.

A mis padres, María Loor y Wilmer Zambrano, quienes han sido el mayor ejemplo de amor, sacrificio y entrega en mi vida. Gracias por cada palabra de aliento, por su apoyo incondicional y por enseñarme con su ejemplo el valor de la perseverancia. Todo lo que soy y he logrado se lo debo a ustedes, que siempre confiaron en mí, incluso en los momentos más difíciles.

A mi abuelita, Sebastiana Tubay, por su inmenso cariño, sus consejos constantes y por ser esa luz que siempre me anima a seguir adelante.

A mi pareja, por su comprensión, paciencia y apoyo inquebrantable, siendo mi refugio y motivación permanente durante esta etapa.

A mi director de tesis, el Ing. Diego Intriago, M. Sc, a quien expreso mi más profundo respeto y admiración. Su dedicación, excelencia profesional y orientación constante fueron fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo; agradezco sinceramente cada consejo y el tiempo brindado para guiarme en este proceso académico y personal.

Finalmente, a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, por ser el espacio donde crecí como persona y profesional, y donde tuve la oportunidad de hacer realidad cada uno de mis sueños.

DEDICATORIA

A Dios, a quienes amo, y a mí mismo, dedico este logro y gratitud profunda.

A mis padres, María Loor y Wilmer Zambrano, y a mi abuelita, Sebastiana Tubay:
Por su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante. Gracias por enseñarme con su ejemplo el valor de la perseverancia y la fe, por alentarme en cada paso y ser el motor fundamental para alcanzar esta meta. Cada logro es reflejo de sus esfuerzos y de todo el amor que siempre me han brindado.

Por acompañarme con cariño, comprensión y alegría en cada etapa de este camino. Gracias
Sumito por creer en mí y animarme siempre a superarme.

RESUMEN

El presente trabajo se centró en la evaluación del desempeño de redes 5G mediante simulaciones en el simulador NS-3, considerando escenarios urbanos macro (UMA) y rurales macro (RMa) con distintas configuraciones de celdas. En la primera etapa se caracterizaron los parámetros del canal radioeléctrico, identificando el impacto de variables como SINR, interferencia, numerología y beamforming sobre la cobertura y la capacidad. Posteriormente, se realizaron simulaciones con diferentes densidades de celdas, observando que en entornos urbanos la densificación mejora significativamente el throughput y reduce la latencia, aunque también introduce mayor interferencia intercelda que limita la eficiencia espectral. En contraste, en escenarios rurales, el aumento de celdas no se tradujo en una ganancia proporcional de capacidad, mostrando un desempeño más sensible a la distribución espacial de los usuarios. Finalmente, se compararon las métricas de calidad de servicio (throughput, latencia, jitter, pérdida de paquetes y eficiencia espectral), concluyendo que el escenario urbano logra mayor estabilidad y robustez, mientras que el entorno rural presenta más variabilidad y valores atípicos derivados de la propagación y dispersión de usuarios.

Palabras clave: Redes móviles, Latencia, Ancho de banda, Modelos de propagación, Densificación de celdas, Eficiencia espectral.

ABSTRACT

This work focused on evaluating the performance of 5G networks through simulations in the NS-3 simulator, considering Urban Macro (UMA) and Rural Macro (RMa) scenarios with different cell configurations. In the first stage, the parameters of the radio channel were characterized, identifying the impact of variables such as SINR, interference, numerology, and beamforming on coverage and capacity. Subsequently, simulations were carried out with different cell densities, observing that in urban environments densification significantly improves throughput and reduces latency, although it also introduces higher intercell interference that limits spectral efficiency. In contrast, in rural scenarios, the increase in the number of cells did not result in a proportional gain in capacity, showing a performance more sensitive to the spatial distribution of users. Finally, quality of service metrics (throughput, latency, jitter, packet loss, and spectral efficiency) were compared, concluding that the urban scenario achieves greater stability and robustness, while the rural environment presents more variability and outliers derived from propagation conditions and user dispersion.

Keywords: Mobile networks, Latency, Bandwidth, Propagation models, Cell densification, Spectral efficiency.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Problema de la investigación.....	4
1.1.1. Planteamiento del problema	4
1.1.2. Diagnóstico.....	4
1.1.3. Pronóstico	5
1.1.4. Formulación del problema.....	5
1.1.5. Sistematización del problema.....	5
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. Objetivo general	6
1.2.2. Objetivos específicos.....	6
1.3. Justificación.....	6
CAPÍTULO II.....	7
MARCO TEORICO	7
2.1. Marco conceptual	8
2.1.1. Redes de quinta generación (5g)	8
2.1.2. 5g nr.....	9
2.1.3. Latencia ultrafiabile y baja (urllc)	9
2.1.4. Banda ancha móvil mejorada (embb).....	10
2.1.5. Mimo	11
2.1.6. Direccionamiento del haz (beamforming).....	11
2.1.7. Cobertura	12
2.1.8. Capacidad de la red	12
2.1.9. Ancho de banda	12
2.1.10. Latencia	12

2.1.11.	Celdas	12
2.1.12.	Densificación de celdas	14
2.1.13.	Calidad de servicio (qos)	14
2.1.14.	Calidad de experiencia (qoe)	14
2.1.15.	Simulador ns-3.....	14
2.1.16.	Relación señal interferencia ruido(sinr)	15
2.1.17.	Jitter	15
2.1.18.	Pérdida de paquetes	15
2.1.19.	Modelo 3gpp 38.901.....	16
	Escenarios de propagación del modelo	16
2.1.20.	Numerología	17
2.2.	Marco referencial.....	18
2.3.	Marco legal.....	21
2.3.1.	Constitución de la república del ecuador.....	21
2.3.2.	Ley orgánica de telecomunicaciones	22
CAPÍTULO III		23
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		23
3.1.	Localización	24
3.2.	Tipos de Investigación.....	24
3.2.1.	Investigación bibliográfica	24
3.2.2.	Investigación cuantitativa	24
3.2.3.	Investigación descriptiva	25
3.3.	Métodos de investigación	25
3.3.1.	Método inductivo.....	25
3.3.2.	Método deductivo	25
3.4.	Diseño de investigación.....	25
3.4.1.	Diseño bibliográfico	25

3.4.2.	Diseño experimental	25
3.5.	Fuentes de recopilación de información	26
3.5.1.	Fuentes primarias.....	26
3.5.2.	Fuentes secundarias:	26
3.6.	Fases de la investigación	26
CAPÍTULO IV		28
RESULTADO Y DISCUSIÓN		28
4.1.	Características del canal radioeléctrico.	29
4.1.1.	Identificación de variables.....	31
4.2.	Simulación de celdas en diferentes escenarios	35
4.2.1.	Entorno de desarrollo y herramientas.....	35
4.2.2.	Modelado de celdas	36
4.2.3.	Configuración de generación de tráfico.....	39
4.2.4.	Distribución geográfica de usuarios	41
4.2.5.	Resultados de 1 celda	45
4.2.6.	Resultados de 3 celdas.....	47
4.2.7.	Resultados de 5 celdas.....	48
4.2.8.	Resultados de 7 celdas.....	50
4.2.9.	Resultados de 9 celdas.....	52
4.2.10.	Simulación con menor carga de usuarios	54
4.2.11.	Discusión	60
4.3.	Comparación del rendimiento de las celdas	61
4.3.1.	Discusión	66
4.3.2.	Comparación de escenarios de latencia y pérdidas con una nueva distribución de usuarios en celdas críticas.....	67
4.3.3.	Comparación de escenarios con baja carga de usuarios	73
4.4.	Resumen de resultados	80

CAPÍTULO V.....	82
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
5.1. Conclusiones.....	83
5.2. Recomendaciones	83
CAPÍTULO VI	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
CAPÍTULO VII.....	93
ANEXOS.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Características de una red 5G.....	8
Figura 2 Espectro 5G-NR: rangos de frecuencia FR1 (sub-6 GHz) y FR2 (mmWave).	9
Figura 3 Aplicaciones de URLLC	10
Figura 4 Representación de un canal MIMO 3×3 entre antenas transmisoras (TX) y receptoras (RX).	11
Figura 5 Lugar de la investigación	24
Figura 6 Estudios previos	29
Figura 2 Modelos teóricos	30
Figura 8 Radar de usabilidad por generación	34
Figura 9 Escenario de simulación con 1 celda en entorno denso y disperso.....	42
Figura 10 Escenario de simulación con 3 celdas en entorno denso y disperso	43
Figura 11 Escenario de simulación con 5 celdas en entorno denso y disperso	43
Figura 12 Escenario de simulación con 7 celdas en entorno denso y disperso	44
Figura 13 Escenario de simulación con 9 celdas en entorno denso y disperso	45
Figura 14 Relación del throughput entre escenarios y números de celdas.....	61
Figura 15 Relación del jitter entre escenarios y números de celdas.....	62
Figura 16 Relación de la latencia URLLC entre escenarios y números de celda.....	63
Figura 17 Relación de la latencia eMBB entre escenarios y números de celdas.....	64
Figura 18 Relación de la pérdida de paquetes entre escenarios y números de celdas	64
Figura 19 Relación del SINR entre escenarios y números de celdas	65
Figura 20 Relación de la eficiencia espectral entre escenarios y números de celdas	66

Figura 21 Relación del throughput en UMa con 7 celdas y en RMa con 9 celdas.....	69
Figura 22 Relación de la latencia URLLC en UMa con 7 celdas y en RMa con 9 celdas..	70
Figura 23 Relación de la latencia eMBB en UMa con 7 celdas y en RMa con 9 celdas	71
Figura 24 Relación del jitter en UMa con 7 celdas y en RMa con 9 celdas.....	72
Figura 25 Relación de la pérdida de paquetes en UMa con 7 celdas y en RMa con 9 celdas	73
Figura 26 Escenario de 1 celda con baja carga de usuario	74
Figura 27 Escenario de 3 celdas con baja carga de usuario.....	74
Figura 28 Escenario de 5 celdas con baja carga de usuario.....	74
Figura 29 Escenario de 7 celdas con baja carga de usuario.....	75
Figura 30 Escenario de 9 celdas con baja carga de usuario.....	75
Figura 31 Relación del throughput entre celdas	76
Figura 32 Relación del jitter entre celdas	76
Figura 33 Relación de la latencia URLLC entre celdas	77
Figura 34 Relación de la latencia EMBB entre celdas	78
Figura 35 Relación de la pérdida de paquetes entre celdas	79
Figura 36 Relación del SINR entre celdas	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características de las celdas.....	13
Tabla 2 Umbrales de Jitter Aceptables por Aplicación.....	15
Tabla 3 Niveles de Pérdida de Paquetes Aceptables.....	16
Tabla 4 Numerologías de transmisión soportadas por 3GPP	18
Tabla 5 Parámetros del modelamiento.....	32
Tabla 6 Especificaciones del sistema de simulación	35
Tabla 7 Funcionalidades de las clases implementadas en la simulación	35
Tabla 8 Parámetros de configuración del escenario de simulación	36
Tabla 9 Parámetros de configuración del sistema 5G simulado	37
Tabla 10 Parámetros de planificación y núcleo de red	38
Tabla 11 Configuración de tráfico eMBB.....	39
Tabla 12 Configuración de tráfico URLLC	40
Tabla 13 Resultados de desempeño de 1 celda en escenarios UMa y RMa	45
Tabla 14 Resultados de desempeño de 3 celdas en escenarios UMa y RMa.....	47

Tabla 15 Resultados de desempeño de 5 celdas en escenarios UMA y RMa.....	48
Tabla 16 Resultados de desempeño de 7 celdas en escenarios UMA y RMa.....	50
Tabla 17 Resultados de desempeño de 7 celdas en escenarios UMA y RMa: semilla 2	51
Tabla 18 Resultados de desempeño de 9 celdas en escenarios UMA y RMa.....	52
Tabla 19 Resultados de desempeño de 9 celdas en escenarios UMA y RMa: semilla 2	53
Tabla 20 Resultados de desempeño de 1 celda en escenarios UMA y RMa con menor carga de usuarios	55
Tabla 21 Resultados de desempeño de 3 celdas en escenarios UMA y RMa con menor carga de usuarios	56
Tabla 22 Resultados de desempeño de 5 celdas en escenarios UMA y RMa con menor carga de usuarios	57
Tabla 23 Resultados de desempeño de 7 celdas en escenarios UMA y RMa con menor carga de usuarios	58
Tabla 24 Resultados de desempeño de 9 celdas en escenarios UMA y RMa con menor carga de usuarios	60
Tabla 25 Comparación 7 Celdas vs. 7 Celdas Seed 2 UMa	67
Tabla 26 Comparación 9 Celdas vs. 9 Celdas Seed 2 RMa.....	68
Tabla 27 Resumen de resultados	80

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Diagrama de flujo del código.....	94
Anexo 2 Código de programación.....	95
Anexo 3 Documento 3GPP TR 38.901 (Release 17)	95
Anexo 4 Documento 3GPP TS 38.211 (Release 17)	95
Anexo 5 Documento 3GPP TS 38.104 (Release 17).....	95

CÓDIGO DUBLIN

Título:	Modelamiento de celdas en comunicaciones móviles para la optimización en redes de quinta generación.					
Autor:	Wilmer Steveen Zambrano Loor					
Palabras claves:	Redes móviles	Latencia	Ancho de banda	Modelos de propagación	Densificación de celdas	Eficiencia espectral
Fecha de publicación:	Noviembre, 2025					
Editorial:	Quevedo- UTEQ, 2025					
Resumen:	El presente trabajo se centró en la evaluación del desempeño de redes 5G mediante simulaciones en el simulador NS-3, considerando escenarios urbanos macro (UMA) y rurales macro (RMa) con distintas configuraciones de celdas. En la primera etapa se caracterizaron los parámetros del canal radioeléctrico, identificando el impacto de variables como SINR, interferencia, numerología y beamforming sobre la cobertura y la capacidad. Posteriormente, se realizaron simulaciones con diferentes densidades de celdas, observando que en entornos urbanos la densificación mejora significativamente el throughput y reduce la latencia, aunque también introduce mayor interferencia intercelda que limita la eficiencia espectral. En contraste, en escenarios rurales, el aumento de celdas no se tradujo en una ganancia proporcional de capacidad, mostrando un desempeño más sensible a la distribución espacial de los usuarios. Finalmente, se compararon las métricas de calidad de servicio (throughput, latencia, jitter, pérdida de paquetes y eficiencia espectral), concluyendo que el escenario urbano logra mayor estabilidad y robustez, mientras que el entorno rural presenta más variabilidad y valores atípicos derivados de la propagación y dispersión de usuarios.					
Abstract:	This work focused on evaluating the performance of 5G networks through simulations in the NS-3 simulator, considering Urban Macro (UMA) and Rural Macro (RMa) scenarios with different cell configurations. In the first stage, the parameters of the radio channel were characterized, identifying the impact of variables such as SINR, interference, numerology, and beamforming on coverage and capacity. Subsequently, simulations were carried out with different cell densities, observing that in urban environments densification significantly improves throughput and reduces latency, although it also introduces higher intercell interference that limits spectral efficiency. In contrast, in rural scenarios, the increase in the number of cells did not result in a proportional gain in capacity, showing a performance more sensitive to the spatial distribution of users. Finally, quality of service metrics (throughput, latency, jitter, packet loss, and spectral efficiency) were compared, concluding that the urban scenario achieves greater stability and robustness, while the rural environment presents more variability and outliers derived from propagation conditions and userZ dispersion.					
Descripción:	111 hojas : dimensiones, 29 x 21 cm + CD-ROM 6162					
URI:						

INTRODUCCIÓN

En el contexto global, la evolución de las telecomunicaciones marca un punto de inflexión, prometen mejoras significativas en ancho de banda, latencia y capacidad en comparación con las redes de cuarta generación (4G) [1]. Su implementación está transformando industrias como el Internet de las Cosas (IoT). En China, el XIV plan quinquenal promueve la aceleración del despliegue y la adopción de redes de quinta generación (5G).

En América Latina, la tecnología 5G está comenzando a implementarse progresivamente. A febrero de 2025, ya se encontraban activos en nueve países los servicios comerciales de las redes de quinta generación [2]. El desarrollo de estrategias para optimizar estas redes se ha convertido en una necesidad prioritaria para operadores y reguladores, con el fin de disminuir la brecha digital y optimizar el desempeño de la red en áreas urbanas y rurales.

En el país, la adopción de tecnologías 5G está en sus fases iniciales, el costo del espectro es el más alto de la región y más de tres veces la mediana regional [3]. No obstante, el despliegue de esta tecnología requiere un análisis de las celdas para garantizar una óptima cobertura y una eficiente asignación de los recursos disponibles. Es esencial determinar el uso de diferentes tipos de celdas, como macroceldas, microceldas, picoceldas, y femtoceldas para su correcta asignación en lo que se requiera.

En el entorno local, las redes de telecomunicaciones todavía dependen de tecnologías de tercera y cuarta generación, según datos del ministerio de telecomunicaciones (MINTEL) del 2022 existe una cobertura poblacional de la tecnología 4G del 77,63%, y el 22,37% de la población aún carece de acceso a servicios básicos de telecomunicaciones en áreas rurales y periféricas [4]. La llegada de las redes 5G trae una opción para superar estos problemas, pero para garantizar un despliegue óptimo, es importante analizar con detalle sobre el modelamiento de celdas, considerando factores como la distribución del tráfico, la densificación de la red y la asignación eficiente del espectro.

La investigación se organiza en varios capítulos, comenzando con la contextualización del problema, donde se expone la situación actual de las telecomunicaciones en Ecuador y se hacen visibles los retrasos que aún frenan la adopción de redes 5G. Un segundo capítulo se adentra en el marco teórico, en donde se detallan conceptos claves de la investigación. El capítulo tres detalla la metodología, a lo largo del trabajo predomina un

enfoque cuantitativo, los resultados se muestran en el capítulo cuatro, donde cada diseño de celda se compara uno a uno y se evalúa su eficiencia. Por último, las conclusiones y recomendaciones en donde se presentan los hallazgos clave que apuntan a líneas de investigación que, de seguirse, prometen optimizar el rendimiento de 5G en el país.

CAPÍTULO I
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de la investigación

1.1.1. Planteamiento del problema

En Ecuador, la adopción de redes 5G ha sido un proceso gradual debido a la necesidad de inversiones en infraestructura y una adecuada planificación del espectro radioeléctrico. De acuerdo con la mancha de cobertura poblacional del Servicio Móvil Avanzado, proporcionada a la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), y reportada por el Ministerio de Telecomunicaciones (MINTEL) en el mes de junio de 2022 en Ecuador existe una cobertura poblacional de la tecnología 4G del 77,63%, y el 22,37% de la población aún carece de acceso a servicios básicos de telecomunicaciones [4].

En ciudades intermedias como Quevedo, la cobertura de redes móviles presenta inconsistencias, especialmente en áreas con alta densidad de usuarios o en zonas periféricas donde la infraestructura es limitada. Esta situación se agrava debido a la congestión en las redes 4G, que genera problemas de latencia y disminución en la velocidad de conexión, afectando la experiencia de los usuarios. Además, la inversión en infraestructura en zonas rurales es limitada debido a el costo de despliegue es elevado en relación con la densidad poblacional y la capacidad de pago de los habitantes [5].

En este contexto, el uso de entornos de simulación se vuelve esencial debido a que nos ayuda a predecir el desempeño de las celdas 5G antes de su implementación real. A través del modelamiento, se evaluó distintas configuraciones, asignaciones espectrales, técnicas de transmisión y escenarios de densidad de tráfico, con el fin de identificar las combinaciones óptimas que garanticen la máxima cobertura y capacidad.

1.1.2. Diagnóstico

En la actualidad, las redes de comunicaciones móviles enfrentan desafíos significativos para atender la demanda de conectividad. Las redes 4G presentan limitaciones en términos de capacidad de red y ancho de banda, especialmente en áreas densamente pobladas y durante picos de tráfico. Estas limitaciones se traducen en una latencia elevada, cobertura insuficiente y variaciones en la calidad del servicio, factores que dificultan la experiencia del usuario final[6] .

El diseño y la planificación de redes requieren un análisis detallado mediante simulaciones para garantizar que las configuraciones propuestas cumplan con los objetivos de maximizar la cobertura y la capacidad.

En los últimos años, la ARCOTEL ha iniciado los procesos para la introducción de redes 5G en el país. En octubre de 2024 se autorizó a la CNT EP el uso del bloque de 3 400 – 3 450 MHz, y en diciembre del mismo año se amplió con la asignación del rango 3 450 – 3 500 MHz a nivel nacional, constituyéndose en las primeras concesiones de espectro para servicios en Ecuador [7]. Estas bandas, correspondientes al rango FR1, han sido priorizadas por su equilibrio entre cobertura y capacidad.

1.1.3. Pronóstico

El cambio hacia redes 5G proporcionó mejores velocidades y cobertura que la actual 4G. La nueva generación opera con una señal de 5 GHz y ofrece velocidades de hasta 1 Gbps, la implementación de configuraciones óptimas para las celdas 5G, identificadas mediante simulaciones, permitió un desempeño significativamente mejorado.

Al utilizar el espectro de ondas milimétricas, se permite utilizar más dispositivos dentro de la misma área geográfica; 4G puede admitir alrededor de 4.000 dispositivos por km², mientras que la 5G soporta alrededor de un millón [8], esto se traduce en una cobertura más uniforme, una capacidad ampliada para soportar grandes volúmenes de tráfico y una experiencia de usuario más confiable.

1.1.4. Formulación del problema

¿Cómo se puede abordar el estudio de celdas 5G para determinar configuraciones óptimas de cobertura y capacidad?

1.1.5. Sistematización del problema

¿Cómo se pueden identificar las variables claves que impactan de forma negativa la cobertura y capacidad en redes 5G?

¿Cómo influye la densificación, el tipo de antenas y la asignación del espectro en la calidad de servicio de las celdas 5G simuladas?

¿Qué configuraciones específicas de celdas 5G pueden optimizarse para garantizar un equilibrio entre cobertura y capacidad en distintos entornos simulados?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Modelar celdas en comunicaciones móviles empleando la caracterización del canal y técnicas de asignación de recursos en redes de quinta generación para su optimización.

1.2.2. Objetivos específicos

- Investigar las características del canal radioeléctrico, mediante el estudio de datos y modelos teóricos, identificando las variables clave que afectan la cobertura y la capacidad.
- Simular celdas en diferentes escenarios en redes de quinta generación mediante software especializado analizando el impacto en la asignación de recursos.
- Comparar el rendimiento de las configuraciones de las celdas en quinta generación mediante parámetros de calidad validando su optimización.

1.3. Justificación

La investigación surge de la necesidad de superar las limitaciones de las redes de cuarta generación en capacidad, cobertura y calidad de servicio frente al creciente tráfico y la elevada densidad de dispositivos conectados, las redes inalámbricas 4G carecen de suficiente ancho de banda de espectro y capacidad de red para satisfacer las crecientes demandas del mercado, las redes 5G se convierte en un estándar evolutivo que combina más espectros y permite un mayor ancho de banda y velocidades mucho más rápidas para los consumidores[9], [10].

Al modelar celdas de quinta generación se busca anticipar su desempeño, identificar configuraciones óptimas de espectro, densificación y tipos de antenas, y así evitar soluciones costosas e ineficientes en su despliegue real.

La meta principal es establecer lineamientos teóricos y prácticos que orienten el diseño de una infraestructura más robusta, flexible y escalable, capaz de atender las demandas actuales y futuras, sirviendo, así como referencia sólida para futuros despliegues y contribuyendo al avance tecnológico, la competitividad económica y el bienestar social.

CAPÍTULO II
MARCO TEORICO

2.1. Marco conceptual

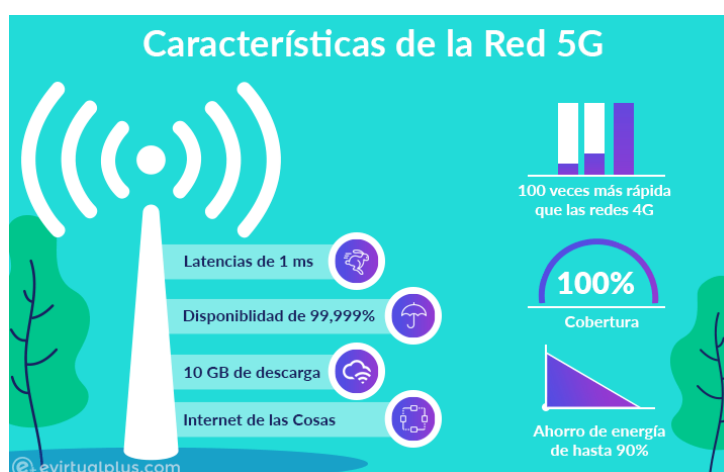
2.1.1. Redes de quinta generación (5g)

Las redes 5G están diseñadas para ofrecer conectividad ultrarrápida y con muy baja latencia a miles de millones de dispositivos, impulsando el Internet de las Cosas (IoT) y un mundo totalmente conectado [11].

Sus objetivos principales son:

- **Velocidades de datos ultrarrápidas:** 5G ofrece velocidades de datos significativamente más rápidas que 4G, lo que permite descargas de alta velocidad y transmisiones de video sin interrupciones [12].
- **Latencia ultrabaja:** Reduce drásticamente el tiempo que tardan los datos en viajar entre dispositivos y servidores de red, alcanzando 1-2 milisegundos (ms) [13]. Esta baja latencia es crucial para aplicaciones en tiempo real donde incluso un pequeño retraso puede tener un impacto significativo en la experiencia del usuario y la seguridad.
- **Capacidad ampliada y sin congestión:** 5G está diseñado para gestionar una cantidad significativamente mayor de dispositivos conectados, con la capacidad de soportar hasta un millón de dispositivos por kilómetro cuadrado, superando con creces los dispositivos que 3G y 4G podían soportar, respectivamente [13].

Figura 1 Características de una red 5G



Nota: Fuente original eVirtualPlus. Infografía “Características de la Red 5G”, reproducida y adaptada de [14].

2.1.2. 5g nr

5G New Radio, el estándar global para una interfaz aérea, cubrirá espectros que no se utilizan en 4G [15]. Esto se refiere tanto a las tecnologías de la capa física que gestionan la transmisión de datos entre dispositivos como a la infraestructura básica que gestiona cómo se comunican estos dispositivos [16].

La tecnología de acceso móvil 5G New Radio (NR) se centra en el Ancho de Banda Móvil Mejorado (eMBB), las comunicaciones de ultra alta fiabilidad y baja latencia (URLLC) y la conectividad masiva del Internet de las Cosas (mIoT) para servir a industrias verticales [17].

5G NR ofrece dos métodos para la implementación llamados F1 y F2

- F1 acepta el espectro por debajo de los 6GHz
- F2 admite el espectro a partir de 24GHz en adelante lo que se conoce como ondas milimétricas o mmWave.

Figura 2 Espectro 5G-NR: rangos de frecuencia FR1 (sub-6 GHz) y FR2 (mmWave).



Nota: Ilustración conceptual del espectro 5G que marca <1, 3, 6, 24, 39 y 100 GHz, y delimita FR1 (<6 GHz) y FR2 (≥ 24 GHz). Reproducida y adaptada de [18].

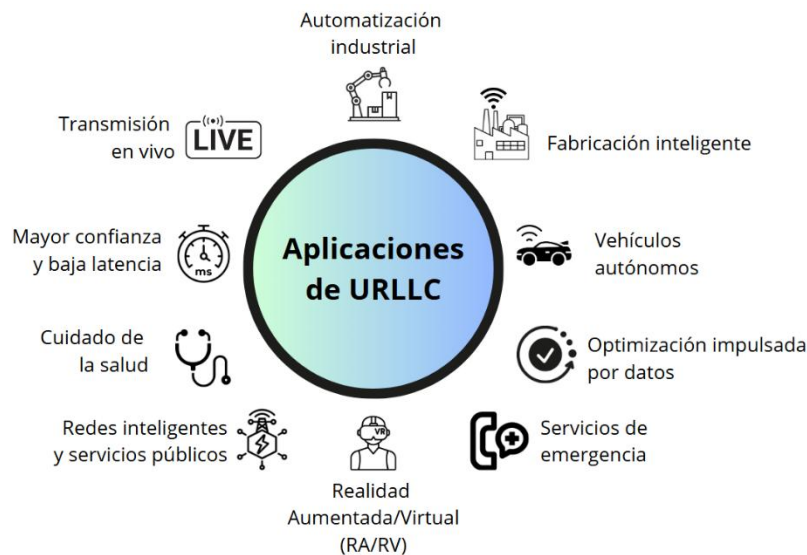
2.1.3. Latencia ultrafiabile y baja (urllc)

Es un subconjunto crítico de la arquitectura de red 5G, URLLC proporciona comunicaciones con latencia extremadamente baja y alta confiabilidad, satisfaciendo las exigencias de servicios críticos que requieren estrictos niveles de latencia y fiabilidad [19]. Esto se consigue mediante funciones avanzadas como la programación prioritaria de datos, la asignación eficiente de recursos y mecanismos de redundancia que hacen que la comunicación sea robusta frente a interferencias o errores de transmisión [20].

URLLC proporciona servicios en tiempo real para escenarios que requieren un tiempo de respuesta de menos de 1 ms. Está diseñada para aplicaciones de misión crítica en las que cualquier pérdida de datos o retraso podría poner en peligro la seguridad o provocar

ineficiencias operativas [20]. Entre los casos de uso cubiertos por URLLC se encuentran la automatización industrial basada en control robótico, conducción autónoma, cirugía remota y drones [21].

Figura 3 Aplicaciones de URLLC



Nota: Infografía elaborada por Zambrano Loor Wilmer Steveen.

2.1.4. Banda ancha móvil mejorada (embb)

La Banda Ancha Móvil Mejorada (eMBB) es un pilar de las redes 5G, centrada en mejorar las experiencias de banda ancha móvil en velocidad, latencia y capacidad en comparación con las redes 4G [22]. El objetivo principal de eMBB es satisfacer la alta y siempre creciente demanda de servicios que requieren un volumen de datos considerablemente alto [22].

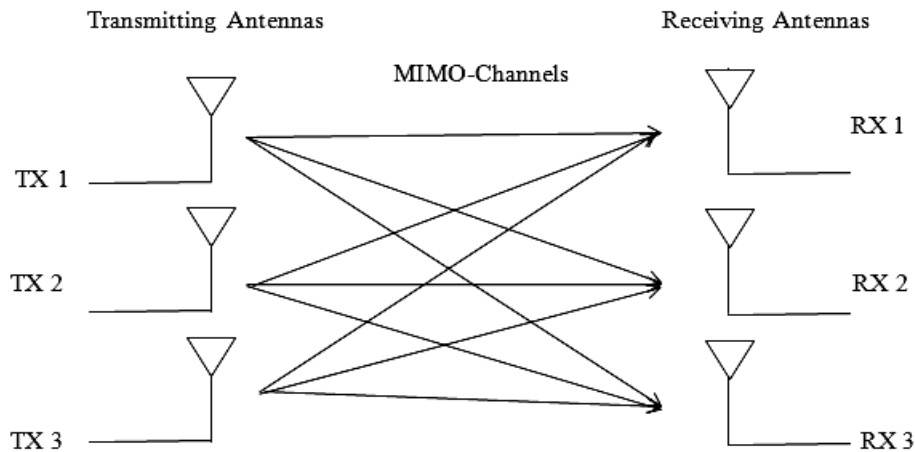
Los objetivos de eMBB se pueden alcanzar mediante la aplicación de tecnologías avanzadas. Estas incluyen formación de haces, MIMO masivo y agregación de portadoras, que, entre otros, están diseñadas para aumentar la capacidad de la red y mejorar la eficiencia espectral [22].

Las aplicaciones y casos de uso habilitados por eMBB son diversos. Estos incluyen streaming de video en ultra alta definición 4K y 360 grados, aplicaciones de realidad virtual y aumentada, así como CCG (Juegos en la Nube) y juegos en línea a través de video con respuestas en tiempo real [22].

2.1.5. Mimo

La tecnología Múltiple Entrada, Múltiple Salida (MIMO) mejora de forma notable las comunicaciones inalámbricas, pues ha sido diseñada para aumentar la capacidad de un enlace de radio mediante el uso de múltiples antenas en el transmisor y también en el receptor [23]. Consiste en una estación base que emplea un gran número de antenas para atender a múltiples equipos de usuario (UE) simultáneamente dentro de un intervalo de tiempo y frecuencia dado. Debido a su mayor eficiencia espectral, esta tecnología nos ofrecerá reutilización del ancho de banda y mayores velocidades de transmisión de los datos transferidos a los usuarios [24].

Figura 4 Representación de un canal MIMO 3×3 entre antenas transmisoras (TX) y receptoras (RX).



Nota: Esquema de los enlaces entre tres antenas transmisoras y tres antenas receptoras que ilustra los “canales MIMO”. Reproducida y adaptada de [25].

2.1.6. Direccionamiento del haz (beamforming)

La conformación de haces, o beamforming en inglés, es una tecnología utilizada en el campo de las comunicaciones inalámbricas y en sistemas de antenas. Su enfoque principal es dirigir una señal inalámbrica en una dirección particular en lugar de dejarla expandirse en todas las direcciones [26].

Al enfocar el haz hacia el dispositivo, las interferencias se minimizan y el rango efectivo o cobertura del dispositivo se incrementa [26].

2.1.7. Cobertura

Espacio geográfico que está previamente autorizado a través de un contrato de concesión para proporcionar conectividad inalámbrica a los usuarios, determinado por la capacidad de las estaciones base y la configuración del espectro radioeléctrico asignado [27].

2.1.8. Capacidad de la red

La capacidad es la cantidad de tráfico que la red puede manejar, es decir, la cantidad de datos que la red puede procesar simultáneamente para todos los mensajes e información enviada [28].

2.1.9. Ancho de banda

El ancho de banda se refiere a la cantidad de datos que pueden transferirse a través de una conexión en un instante determinado. Generalmente, se expresa en múltiplos de bits por segundo (bps), como megabits por segundo (Mbps) o gigabits por segundo (Gbps) [29].

2.1.10. Latencia

La latencia de red se refiere al tiempo de demora en la transmisión de datos a través de una red. Representa el intervalo que tardan los datos en moverse de un punto a otro. Las redes con tiempos de retraso más largos presentan una latencia alta, mientras que aquellas con tiempos de respuesta más rápidos tienen una latencia baja [30].

2.1.11. Celdas

En todos los sistemas celulares, el área de cobertura de un operador es dividida en celdas. Una celda corresponde a una zona cubierta por un transmisor o un pequeño grupo de transmisores. El tamaño de la celda depende de la potencia del transmisor, banda de frecuencia utilizada, altura y posición de la torre de la antena, el tipo de antena, la topografía del área y la sensibilidad del radio receptor [31].

La arquitectura de red 5G se caracteriza por una combinación de diferentes tipos de celdas:

Macrocelas: Una macrocelda proporciona cobertura en grandes áreas geográficas. Usualmente están instaladas en techos y postes, y en ocasiones, en torres terrestres. El principal beneficio en el uso de macrocelda en 5G es facilitar el acceso a servicios en una gran extensión geográfica [32].

Celdas pequeñas: Se refiere a la utilización de nodos de acceso de radio de baja potencia para proporcionar cobertura inalámbrica localizada. Estos nodos funcionan en espectros licenciados, no licenciados o compartidos y están destinados a complementar redes macrocelulares tradicionales. Su tamaño compacto, que a menudo se asemeja a una caja de zapatos o una mochila, junto con su baja potencia de salida de 0.1 a 10 W, permiten la instalación en farolas, paredes e incluso techos [33]. Pueden tener tres formas:

Microceldas: Son las más potentes de las pequeñas celdas en términos de alcance y número de usuarios admitidos hasta 200 usuarios [34].

Picoceldas: Soportan hasta 64 usuarios, está dirigido principalmente a aplicaciones en interiores [34].

Femtoceldas: Las femtoceldas soportan entre 8 y 16 usuarios, además, tienen un alcance más corto [34].

Tabla 1 Características de las celdas

Características	Macrocela	Microcela	Picocelda	Femtocelda
Tamaño	Grande (torres, tejados)	Compacta (montada en farolas)	Compacta (tamaño de caja de zapatos)	Muy compacta (tamaño de router doméstico)
Rango de Cobertura	Varios kilómetros (amplia)	500m – 2km	100 – 250m	10 – 50 m
Consumo de Energía	Alto (dependiente de la red)	Entre 5 y 10W	Entre 1 y 5W	Menor a 0,1W
Usuarios Soportados (aprox.)	Miles	Hasta 200	Hasta 64	8-16

2.1.12. Densificación de celdas

La densificación se refiere al incremento en la cantidad de tecnologías y componentes utilizados en una red, como la creciente adopción y demanda de fibra óptica en la actualidad.

Para garantizar el éxito de 5G, es fundamental contar con una red altamente densa. Esto se puede alcanzar mediante la incorporación de más celdas de red, ya sea a través de redes de acceso por radio o mediante la instalación de infraestructuras inalámbricas, ya sean celdas pequeñas o de mayor tamaño [35].

2.1.13. Calidad de servicio (qos)

Mantener la calidad de transmisión y diagnosticar errores que ocurren en la red de tráfico. La función principal de QoS es proporcionar una buena accesibilidad al servicio al usuario final [36].

2.1.14. Calidad de experiencia (qoe)

La Calidad de Experiencia (QoE) es una medida subjetiva para estimar la calidad general del servicio prestado desde el punto de vista del usuario [37].

2.1.15. Simulador ns-3

El simulador ns-3 es una herramienta de simulación de redes basada en eventos discretos, diseñada principalmente para fines educativos y de investigación. ns3 proporciona modelos de cómo funcionan y se desempeñan las redes de datos en paquetes, y proporciona un motor de simulación para que los usuarios realicen experimentos de simulación. Algunas de las razones para utilizar ns3 incluyen la realización de estudios que son más difíciles o imposibles de realizar con sistemas reales, para estudiar el comportamiento del sistema en un entorno altamente controlado y reproducible, y para aprender sobre cómo funcionan las redes. Algunas características son las siguientes:

- Está diseñado como un conjunto de bibliotecas que pueden combinarse entre sí y también con otras bibliotecas de software externas. Utiliza comandos y herramientas de desarrollo de software C++ o Python.
- Se utiliza principalmente en sistemas Linux o macOS, aunque existe compatibilidad con sistemas BSD y también con marcos de Windows que pueden crear código Linux, como Windows Subsystem for Linux o Cygwin [38].

2.1.16. Relación señal interferencia ruido(sinr)

El SINR se define como la relación entre la potencia de la señal deseada y la suma de la potencia de la interferencia y la potencia del ruido de fondo [39]. A diferencia del SNR (relación señal a ruido), que considera únicamente el ruido de fondo, el SINR incorpora explícitamente el término de interferencia (I). Esta inclusión es fundamental para modelar el comportamiento de las redes celulares reales, donde la interferencia de otras celdas y la auto interferencia son factores dominantes que limitan el rendimiento del sistema [40].

La relevancia del SINR trasciende la simple medición y se convierte en un pilar del rendimiento de la red. De acuerdo con el límite de Shannon, la capacidad teórica de un canal (C) es una función directa del ancho de banda (B) y del SINR [39]. La optimización del SINR, ya sea aumentando la potencia de transmisión o minimizando la interferencia, conduce a una mayor capacidad de la celda [39]

2.1.17. Jitter

Se refiere a la variabilidad en el retardo de la entrega de paquetes a través de una red [41].

La fórmula básica para calcular el jitter es:

Jitter = Retardo Máximo - Retardo Mínimo[42].

Tabla 2 Umbrales de Jitter Aceptables por Aplicación

Aplicación	Jitter Aceptable (ms)
VoIP	< 30 ms
Video llamadas	< 30-50 ms
Streaming media	< 100 ms
Transferencias de datos generales	< 100 ms

2.1.18. Pérdida de paquetes

La pérdida de paquetes ocurre cuando una o más unidades de datos, conocidas como paquetes, que viajan a través de una red informática, no logran llegar a su destino previsto [43]. Los paquetes son pequeñas unidades de datos transmitidas desde una fuente a un destino a través de una red [44].

Tabla 3 Niveles de Pérdida de Paquetes Aceptables

Nivel de Pérdida de Paquetes (%)	Impacto/Calidad	Aplicación (Ejemplos)
0%	Ideal, sin impacto	Todas las aplicaciones
< 0.1%	Imperceptible o mínimo	TCP/IP, la mayoría de las aplicaciones
0.05% - 1%	Notable para video, aceptable para la mayoría	Video (perceptible), VoIP (aceptable)
1% - 2%	Impacto significativo en VoIP, aceptable para otros	VoIP (impacto significativo), la mayoría de las aplicaciones (aceptable)
> 2%	Muy molesto para video, significativo para VoIP	Video (muy molesto), VoIP (significativamente afectado)
5% - 10%	Impide significativamente las llamadas VoIP	VoIP (deterioro severo)

2.1.19. Modelo 3gpp 38.901

El modelo 3GPP TR 38.901 es un modelo de canal estocástico preciso y compatible recomendado por el Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP) para el rango de frecuencia de 0.5 GHz a 100 GHz [45]. Su objetivo principal es ayudar a los ingenieros de comunicaciones en el diseño, optimización y evaluación del rendimiento de técnicas de capa física en sistemas 5G [45]. Este modelo está en alineación con trabajos anteriores, como el modelo de canal espacial tridimensional (3GPP TR 36.873) y IMT-Advanced (ITU-R M.2135), y se utiliza tanto en simulaciones a nivel de enlace como de sistema en una amplia gama de escenarios [45].

Escenarios de propagación del modelo

El modelo 3GPP TR 38.901 es particularmente valioso debido a su capacidad para simular diversas condiciones de propagación, las cuales se agrupan en escenarios específicos [45].

Estos escenarios son fundamentales para modelar el comportamiento del canal de comunicación en diferentes entornos geográficos y arquitectónicos [45].

Los principales escenarios de propagación definidos en el modelo son:

- **UMa (Macrocela Urbana):** Este escenario representa un entorno macrocelular en áreas urbanas. Se distingue por una altura de antena de estación base (BS) de 25 metros, lo cual es típico de las implementaciones a gran escala en ciudades [45]. La simulación en este escenario ayuda a entender cómo se propagan las señales en áreas urbanas extensas, donde la densidad de edificaciones y la altura de las antenas son factores críticos [45].
- **UMi-Street Canyon (Microcela Urbana, cañón de calle):** Este escenario modela el entorno de microceldas urbanas, específicamente en áreas conocidas como "cañones de calles". A diferencia del UMa, este escenario utiliza una altura de antena de BS de 10 metros, lo que refleja un despliegue a menor escala, como el que se podría encontrar en zonas residenciales o comerciales con calles estrechas [45]. La propagación de la señal en este caso está fuertemente influenciada por la reflexión y difracción en las paredes de los edificios [45].
- **RMa (Macro rural):** El escenario de macro rural se utiliza para simular las condiciones de propagación en áreas rurales o con poca densidad de construcciones. Se caracteriza por un entorno abierto, lo que resulta en una menor cantidad de obstáculos y, por ende, en una probabilidad de línea de visión (LOS) más alta en comparación con la mayoría de los escenarios urbanos [45].
- **InH-Office (Punto de acceso interior - oficina):** Este escenario se centra en la propagación de la señal dentro de edificios de oficinas [45]. La altura de la antena de la estación base en este caso es de 3 metros, adaptada para entornos interiores [45]. La simulación considera la atenuación y la dispersión causadas por paredes, muebles y otros elementos internos de un edificio [45].

2.1.20. Numerología

La numerología de subportadoras es una de las características más destacadas de 5G NR, que rompe con el espaciado de subportadoras (SCS) fijo de 15 kHz utilizado en LTE [46]. En 5G NR, la numerología se define como un conjunto flexible de parámetros de la forma de onda OFDM, siendo el SCS el más importante [47]. Esta escalabilidad permite que el

sistema 5G se adapte a una variedad de escenarios de despliegue, bandas de frecuencia y requisitos de servicio [46].

Los estándares 3GPP, particularmente el 3GPP TS 38.211, especifican las numerologías y los SCS correspondientes.

La siguiente tabla consolida las numerologías soportadas hasta el lanzamiento 17, incluyendo los SCS y los canales físicos compatibles [46].

Tabla 4 Numerologías de transmisión soportadas por 3GPP

Numerología (μ)	Espaciado de subportadoras (Δf)	Tipo de prefijo cíclico (CP)	Duración del slot (ms)	Número de símbolo
0	15 kHz	Normal	1	14
1	30 kHz	Normal	0.5	14
2	60 kHz	Normal, Extendido	0.25	14 12
3	120 kHz	Normal	0.125	14
4	240 kHz	Normal	0.062	14
5	480 kHz	Normal	0.031	14
6	960 kHz	Normal	0.015	14

2.2.Marco referencial

Mejorar la conexión de red más allá de 5G y 6G mediante comunicación híbrida RF-FSO: un examen de la integración de satélites HAPS y LEO.

El estudio propone una integración híbrida de tecnologías de radiofrecuencia y óptica de espacio libre (RF-FSO) para redes más allá de 5G. Este enfoque busca mejorar la cobertura y la confiabilidad en áreas rurales con conectividad intermitente. Si bien el estudio presenta avances importantes, deja de lado los desafíos en entornos urbanos densos, donde la congestión y el tráfico elevado representan problemas críticos. Además,

en estos escenarios, el tráfico en horas pico podría afectar significativamente el desempeño de las redes, un aspecto crucial que no es abordado en el análisis [48].

Una encuesta sobre la mejora de la cobertura en redes celulares: desafíos y soluciones para futuras implementaciones.

El artículo ofrece un desglose detallado de los desafíos y soluciones para mejorar la cobertura en redes móviles, subrayando especialmente las redes 5G. A través de una revisión de tecnologías como la densificación de redes, el uso de frecuencias altas y bajas, la gestión de interferencias, además se usan cómo técnicas avanzadas MIMO masivo y beamforming pueden mejorar significativamente la cobertura en redes densamente pobladas en áreas rurales y remotas. Sin embargo, el artículo no profundiza lo suficiente en los aspectos prácticos de la implementación de estas soluciones, lo que representa un desafío para la investigación aplicada, como la simulación de configuraciones de celdas en entornos urbanos densos. Destaca que el uso de técnicas como beamforming puede mitigar algunos problemas de cobertura en mm-Wave, pero no aborda en profundidad los retos que estos enfoques enfrentan en cuanto a la sincronización y el control de la interferencia en redes de alta densidad [49].

Evaluación de la tecnología 5G de vehículo a todo (V2X), comunicaciones en escenarios urbanos.

En el estudio se evaluó las comunicaciones vehiculares usando tecnología 5G. El estudio se enfocó en simular el tráfico vehicular con el software SUMO y simular las comunicaciones con ns-3, aplicando el modelo de propagación UMa 3GPP para representar condiciones urbanas considerando obstáculos como edificios y vegetación. Además, presentó una comparación entre escenarios con y sin el modelo UMa, resaltando cómo los obstáculos urbanos afectan métricas clave como la tasa de recepción de paquetes y la latencia, lo que sugiere que usar modelos de propagación realistas es esencial para simulaciones precisas. Sin embargo, la falta de una discusión más profunda sobre técnicas de optimización de antenas y mejora de la señal limita la aplicabilidad del estudio en contextos de simulación más avanzados [50].

Mejora de cobertura y fundamentos, rendimiento del 5G: análisis y pruebas de campo.

El documento revisa las diferentes técnicas de mejoramiento de cobertura en redes 5G, especialmente en la frecuencia de 3.5 GHz. A medida que las redes 5G se despliegan en frecuencias más altas, como 3.5 GHz, se presentan desafíos de cobertura debido a la atenuación de la señal. Se analizan las técnicas para solventar el problema de cobertura, que incluyen, 3D-MIMO, beamforming y reutilización de sitios 4G. Los resultados de las prueba mostraron que la cobertura de 5G mejoró hasta 676 metros en un escenario de vista no lineal, en comparación con solamente 195 metros en redes 4G, lo que demuestra la eficacia de las técnicas de mejoramiento utilizadas como, UMa y 3D-MIMO. Aunque el enfoque del artículo en la introducción de la técnica mejora de cobertura en un escenario práctico es adecuado, el impacto práctico de beamforming y MIMO aún se debe explorar en mayor profundidad, para lo que la tecnología es para entornos urbanos densamente poblados [51].

Enrutamiento de ruta más corta y capacidad óptima en autogestión, organización de redes 5G mediante aprendizaje automático.

El artículo aborda la optimización de la capacidad y el enrutamiento dinámico en redes 5G autoorganizadas (SON), utilizando aprendizaje automático para mejorar el rendimiento de la red. El enfoque se centra en encontrar la ruta más corta con la capacidad óptima en función de la disponibilidad de recursos, como los Bloques de Recursos Físicos (PRB), y evitando nodos congestionados en la red. A través de simulaciones realizadas en ns-3 y utilizando el algoritmo Q-learning, el artículo demuestra cómo la red SON puede optimizar la asignación de recursos y mejorar la experiencia del usuario al determinar rutas eficientes. La fortaleza del artículo radica en su uso de tecnologías emergentes como el aprendizaje por refuerzo para abordar el desafío de optimizar las rutas en redes móviles de próxima generación, mostrando cómo estas metodologías pueden adaptarse de manera autónoma en tiempo real. No obstante, el estudio no aborda en detalle los desafíos prácticos de integrar este sistema en escenarios urbanos densos con alta congestión de usuarios, lo que podría limitar la aplicabilidad de la metodología en tales contextos [52].

Eficiente gestión de recursos en redes 5G mediante multi-conectividad: un enfoque para alto throughput y baja latencia confiable.

El artículo presenta un análisis detallado de los retos y soluciones para alcanzar las exigencias de las redes 5G y futuras generaciones, enfocándose en la necesidad de combinar altas velocidades de transmisión, baja latencia y confiabilidad bajo escenarios de movilidad. Destaca las limitaciones de las bandas sub-6 GHz (FR1), que aunque ofrecen amplia cobertura, no logran soportar altas tasas de datos por la escasez de espectro, así como las restricciones de las frecuencias milimétricas (FR2), cuyo reducido alcance afecta la estabilidad en entornos móviles. Para superar estas limitaciones, los autores proponen el uso de multi-conectividad (NR-DC), que permite a los equipos de usuario conectarse simultáneamente a una macrocelda en FR1 y a una celda pequeña en mmWave, equilibrando cobertura y rendimiento [53].

Mediante simulaciones en Simu5G, se demuestra que esta estrategia supera los problemas de las redes ultra-densas (UDN), reduciendo pérdidas de paquetes, latencias y número de handovers, al tiempo que incrementa el throughput. Los resultados muestran que NR-DC ofrece un desempeño más robusto con menor densidad de estaciones base, lo que lo convierte en una alternativa más eficiente frente a despliegues únicamente basados en densificación. No obstante, el artículo no profundiza en los aspectos prácticos de implementación a gran escala, como la gestión de interferencias y la viabilidad económica en escenarios urbanos y rurales, lo que plantea un desafío para la investigación aplicada. Aun así, se concluye que la multi-conectividad es clave para habilitar servicios emergentes de 5G, garantizando comunicaciones confiables y de baja latencia en futuros despliegues [53].

2.3.Marco legal

2.3.1. Constitución de la república del ecuador

“Art.16.- Todas las personas, en forma individual o colectiva, tienen derecho a:

El acceso universal a las tecnologías de información y comunicación.

La creación de medios de comunicación social, y al acceso en igualdad de condiciones al uso de las frecuencias del espectro radioeléctrico para la gestión de estaciones de radio y televisión públicas, privadas y

comunitarias, y a bandas libres para la explotación de redes inalámbricas” [54].

“Art. 261.- El Estado central tendrá competencias exclusivas sobre el espectro radioeléctrico y el régimen general de comunicaciones y telecomunicaciones; puertos y aeropuertos” [54].

2.3.2. Ley orgánica de telecomunicaciones

“Art. 3.- Objetivos:

6. Promover que el país cuente con redes de telecomunicaciones de alta velocidad y capacidad, distribuidas en el territorio nacional, que permitan a la población entre otros servicios, el acceso al servicio de Internet de banda ancha” [55].

“Art. 5.- Definición de telecomunicaciones. Se entiende por telecomunicaciones toda transmisión, emisión o recepción de signos, señales, textos, vídeo, imágenes, sonidos o informaciones de cualquier naturaleza, por sistemas alámbricos, ópticos o inalámbricos, inventados o por inventarse. La presente definición no tiene carácter taxativo, en consecuencia, quedarán incluidos en la misma, cualquier medio, modalidad o tipo de transmisión derivada de la innovación tecnológica” [55].

“Art. 6.- Otras Definiciones. Para efectos de la presente Ley se aplicarán las siguientes definiciones:

Espectro radioeléctrico.- Conjunto de ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio sin necesidad de guía artificial utilizado para la prestación de servicios de telecomunicaciones, radiodifusión sonora y televisión, seguridad, defensa, emergencias, transporte e investigación científica, entre otros. Su utilización responderá a los principios y disposiciones constitucionales” [55].

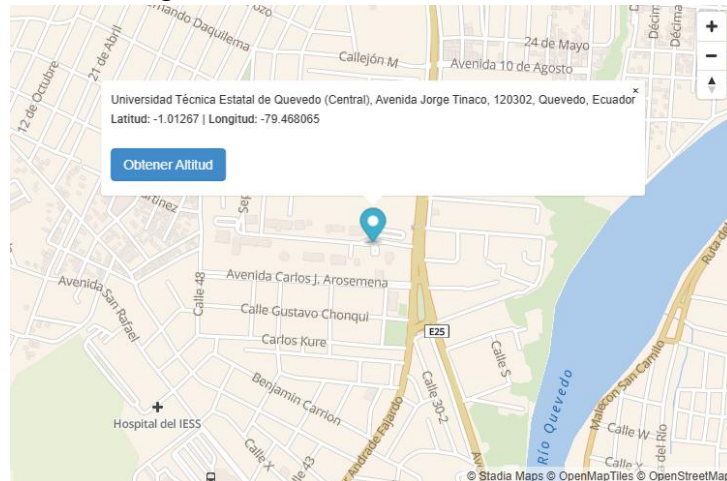
CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización

La investigación se desarrolló en el campus “Ing. Manuel Haz Álvarez” perteneciente a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), específicamente en los laboratorios de la carrera de ingeniería Telemática, ubicada en la ciudad de Quevedo, provincia de Los Ríos, Ecuador, ubicado en las siguientes coordenadas: latitud: -1.01267, longitud: -79.468065.

Figura 5 Lugar de la investigación



Fuente: Google Maps “<https://maps.app.goo.gl/9YMMX2rDRKPsMF4c9>”

3.2. Tipos de Investigación

3.2.1. Investigación bibliográfica

Mediante fuentes bibliográficas como artículos científicos relacionados con el modelamiento de celdas se comprendió el estado del arte del tema estudiado y proporciona una base para poder realizar la investigación en relación con el modelamiento de celdas para la optimización de las redes 5G.

3.2.2. Investigación cuantitativa

Esta investigación se basa en la recolección y análisis de datos numéricos resultantes de las simulaciones del patrón de comportamiento de las celdas 5G, de esta manera se permite medir el estado de las variables como cobertura, capacidad, latencia, throughput, la tasa de error de bits, y el ancho de banda, proporcionando resultados medibles y verificables que sustentan el análisis del rendimiento de la red.

3.2.3. Investigación descriptiva

Se realiza una caracterización sobre el comportamiento y las características del estado actual de la red móvil en el país, analizando el impacto en la cobertura, capacidad y calidad de servicio. Este enfoque proporciona una visión sobre el estado actual de la red sirviendo como base para el análisis y la optimización de configuraciones futuras.

3.3. Métodos de investigación

3.3.1. Método inductivo

Se emplea a través de la observación del comportamiento de las simulaciones realizadas en el entorno NS-3, identificando patrones que afectan a las variables claves como cobertura, latencia, throughput, etc. A partir de esos patrones se formularon las conclusiones que sirven como guía para la optimización de las celdas en redes 5G.

3.3.2. Método deductivo

Se utiliza a partir de teorías, normas y principios generales relacionados con las redes móviles 5G y la gestión del espectro radioeléctrico. Estas bases permiten establecer los parámetros para las simulaciones, lo que incluye la selección de modelos teóricos aplicados a la propagación de señales y la asignación del espectro.

3.4. Diseño de investigación

3.4.1. Diseño bibliográfico

Orientado a la recopilación y análisis de literatura científica existente, esto incluye la revisión de publicaciones académicas, informes técnicos y normativa relevante lo que ayudará a llevar la investigación a un contexto adecuado para comprender teorías y enfoques que sustentan la optimización de redes 5G.

3.4.2. Diseño experimental

El estudio se llevará a cabo con simuladores, particularmente en NS-3 para imitar entornos y arreglos de red 5G. Los ensayos se realizarán en diversos escenarios lo que permitirá la observación del comportamiento de las celdas en diferentes configuraciones y la evaluación de su eficiencia.

3.5. Fuentes de recopilación de información

La información necesaria para el desarrollo de la investigación se obtendrá de fuentes primarias y secundarias, con el objetivo de garantizar un análisis riguroso y fundamentado.

3.5.1. Fuentes primarias

3.5.1.1. Datos generados por simulación en ns-3

Resultados obtenidos de pruebas realizadas en distintos escenarios de modelamiento de celdas, evaluando variables como cobertura, latencia, throughput y calidad del servicio.

3.5.1.2. Observaciones sobre el comportamiento de las redes

Interpretación de patrones de conectividad y comparación de las condiciones de redes actuales con los resultados obtenidos en simulación.

3.5.2. Fuentes secundarias:

3.5.2.1. Documentación normativa

Legislación vigente sobre el espectro radioeléctrico en Ecuador, incluyendo la Constitución, Ley Orgánica de Telecomunicaciones y regulaciones de ARCOTEL.

3.5.2.2. Literatura científica y técnica

Artículos académicos, libros y estudios de caso sobre planificación de redes 5G y estrategias de optimización espectral.

3.6. Fases de la investigación

1. Revisión Bibliográfica y Normativa

Se realizó una recopilación y análisis de estudios científicos, normativas legales y documentación técnica sobre el modelamiento de celdas en redes móviles. Esta etapa permitió establecer el marco teórico y los antecedentes relevantes del problema de investigación.

2. Configuración del Entorno de Simulación

Se definió el escenario experimental utilizando el simulador ns-3, ajustando parámetros clave como:

Tipo de celdas utilizadas (macro, micro, pico y femto).

Distribución espectral y asignación de frecuencias.

Potencia de transmisión y sensibilidad del receptor.

Estos ajustes garantizaron la representación precisa de un entorno de telecomunicaciones realista.

3. Ejecución de Simulaciones y Recopilación de Datos

Se llevó a cabo múltiples simulaciones en ns-3, manipulando variables como la densidad de tráfico, la interferencia espectral y la estrategia de asignación de recursos. Se registró los valores obtenidos para cada configuración, permitiendo evaluar el desempeño de la red en distintos escenarios.

4. Análisis de Resultados y Validación del Modelo

Los datos recopilados en la fase anterior fueron procesados utilizando herramientas estadísticas y modelos comparativos. Se analizaron métricas clave como latencia, rendimiento y tasa de error de bits, determinando las configuraciones óptimas para maximizar la eficiencia de las celdas en redes 5G.

5. Ajustes y Optimización de la Solución Propuesta

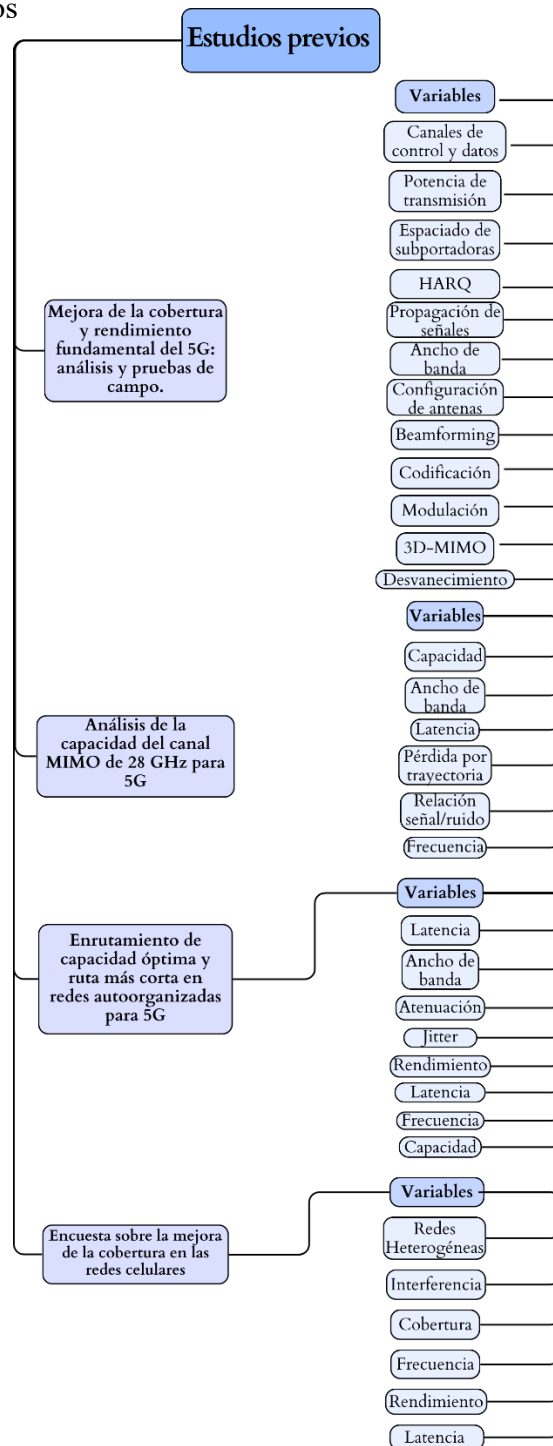
Con base en los hallazgos obtenidos, se realizó ajustes en los parámetros de simulación para refinar las estrategias de asignación espectral y distribución de celdas. Se formuló recomendaciones para la implementación de redes 5G, asegurando la máxima eficiencia en cobertura y capacidad.

CAPÍTULO IV
RESULTADO Y DISCUSIÓN

4.1. Características del canal radioeléctrico.

A partir de una revisión de literatura científica, se agruparon diversos estudios previos que abordan el rendimiento de las redes 5G desde distintas perspectivas, junto a los modelos teóricos más relevantes. La siguiente imagen presenta una síntesis de la recopilación realizada.

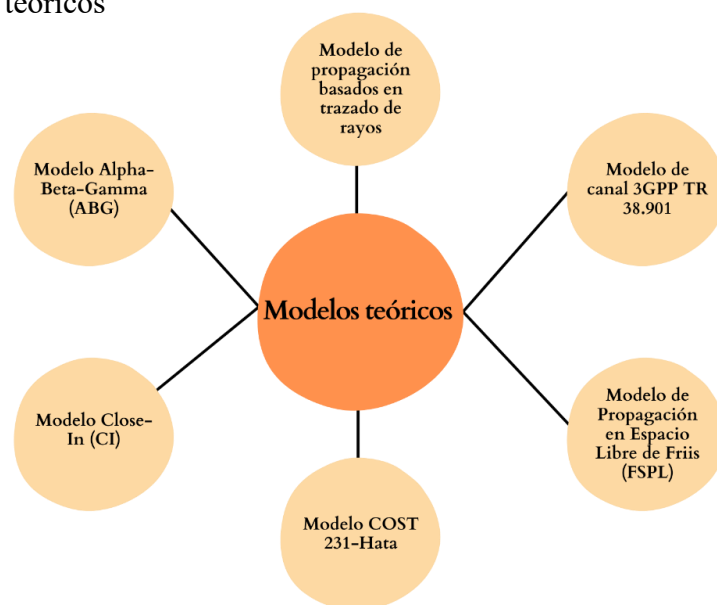
Figura 6 Estudios previos



Esta ilustración destaca las variables más discutidas en la literatura como determinantes del rendimiento de las redes 5G y nos permite identificar patrones comunes en investigaciones recientes. Técnicas como MIMO, Beamforming y técnicas eficientes en espectro se mencionan una y otra vez debido a su capacidad comprobada para mejorar significativamente tanto la cobertura como la capacidad de la red. Liu et al en el 2019 verificaron empíricamente que la formación de haces junto con MIMO 3D de frecuencia media de 3.5 GHz proporcionó una extensión de cobertura significativa sin tener que aumentar la transmisión de potencia, lo que es ventajoso en regiones de alta densidad poblacional [51].

Asimismo, en la investigación de Borralho enfatiza que la cobertura para áreas remotas y rurales se puede mejorar con una selección de frecuencia adecuada y una planificación óptima del ancho de banda disponible [49]. Además, muchos investigadores, enfatizan en las evaluaciones exhaustivas para escenarios urbanos densos debido a desafíos como el rápido desvanecimiento, la interferencia entre celdas y la variabilidad dentro del canal de radio que impacta la experiencia del usuario [56]. Por lo tanto, estos marcos teóricos junto con evidencia empírica proporcionan una base sólida sobre la cual basar futuras simulaciones en este estudio.

Figura 2 Modelos teóricos



Los modelos teóricos elegidos se aplicaron dentro del entorno de simulación NS-3, que se utiliza particularmente en la investigación de telecomunicaciones debido a su flexibilidad y capacidades de modelado realista. Entre los modelos aplicados, se destaca el modelo UMa 3GPP (Macro Urbano) porque se centra en áreas urbanas densas donde edificios altos y otras obstrucciones impiden la cobertura de señal. Este modelo incorpora factores importantes como la pérdida de trayectoria, la desvanecimiento por sombra y los efectos de multi trayecto, que son fundamentales para evaluar el rendimiento de la celda en condiciones realistas.

Además, se examinó los modelos de pérdida de propagación Alpha-Beta-Gamma (ABG) y Close-In (CI) que son frecuentemente utilizados en los estudios de planificación de redes 5G. El modelo ABG se basa empíricamente y utiliza tres parámetros ajustables (α , β y γ) para capturar la dependencia de la pérdida de trayectoria en función de la distancia y la frecuencia, lo que lo hace adecuado para entornos heterogéneos. El modelo CI utiliza una distancia de referencia de 1 metro para la pérdida de trayectoria y se centra en la decadencia de ley de potencias; Este enfoque es más simple y robusto, lo que lo hace particularmente útil para las predicciones en la banda de ondas milimétricas.

Ambos modelos fueron evaluados en escenarios simulados para determinar cuál de ellos se aproxima mejor al comportamiento del canal radioeléctrico para diferentes configuraciones de celda.

4.1.1. Identificación de variables

Partiendo de la ilustración dos se llevó a cabo una elección de variables que influyen en la cobertura y capacidad de la señal. La selección se basa en criterios que tienen un impacto medible en el rendimiento de las redes 5G, siguiendo recomendaciones de investigaciones previas y marcos teóricos establecidos. La selección de estas variables se justifica debido a su relevancia dentro de los modelos teóricos de propagación de señales y en la caracterización del canal radioeléctrico para describir el funcionamiento de 5G en diversos escenarios.

Las variables y su impacto se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 5 Parámetros del modelamiento

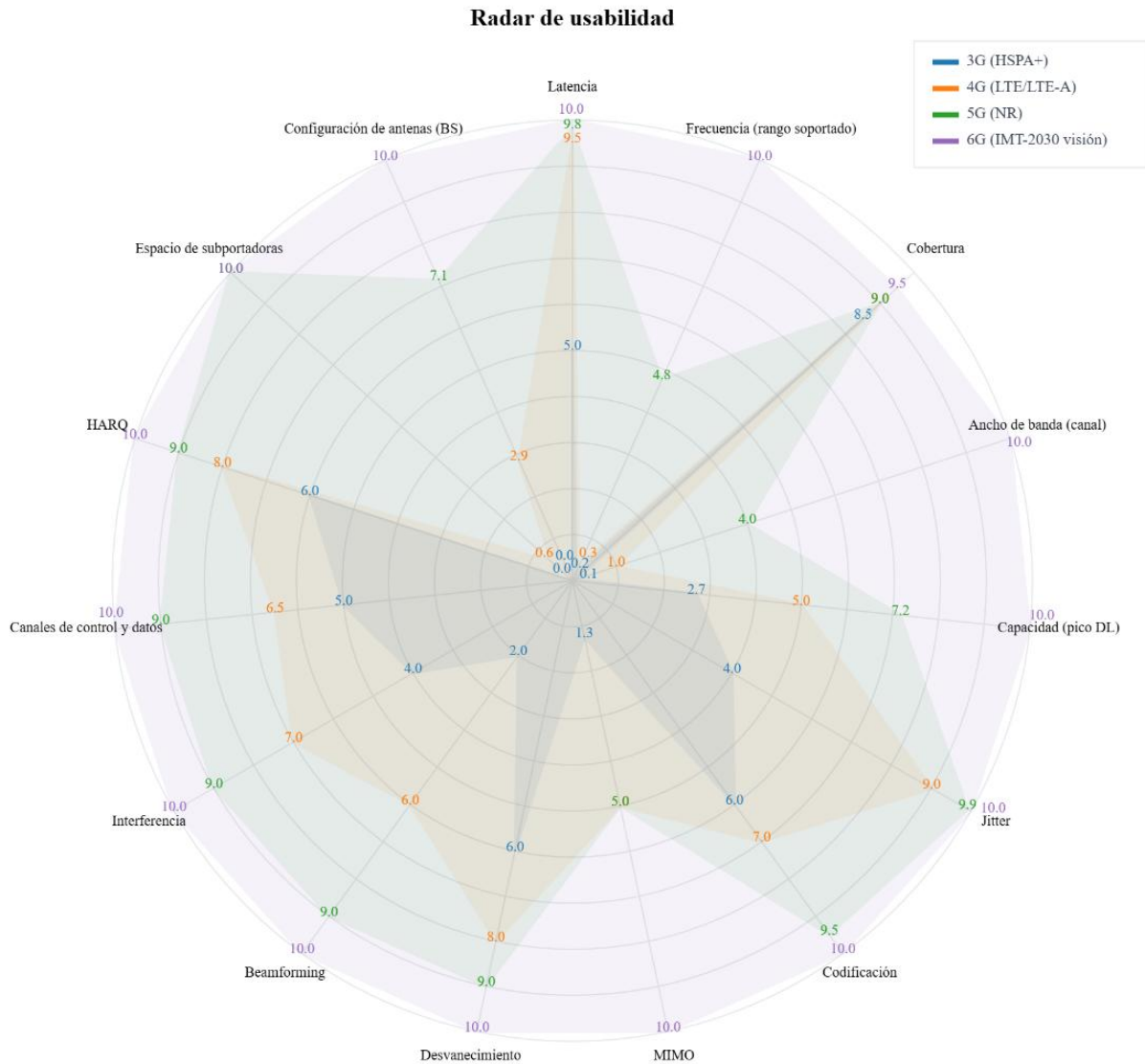
Variable	Impacto
Latencia	No cambia el alcance físico, pero reduce la cobertura de calidad (QoE) para apps sensibles al retardo (voz/RTC/URRLC), especialmente en borde de celda.
Frecuencia	Afecta drásticamente la cobertura (frecuencias más altas tienen menor alcance y mayor atenuación por obstáculos)
Atenuación	Afecta directamente la cobertura. Una mayor atenuación reduce el alcance de la señal y la penetración en edificios, lo que puede requerir una mayor densidad de estaciones base para mantener la cobertura.
Ancho de banda	Un mayor ancho de banda permite transmitir más información por unidad de tiempo, lo que se traduce en mayores velocidades de datos y, por lo tanto, una mayor capacidad de la red.
Desvanecimiento	Afecta a la cobertura al causar que la señal caiga por debajo de un umbral aceptable en ciertos momentos.
Jitter	Reduce la cobertura percibida al romper la continuidad (cortes en voz/video).
Codificación	Afecta la fiabilidad y, por ende, indirectamente la capacidad y la cobertura. Una buena codificación permite recuperar los datos originales incluso con errores de transmisión.
MIMO	Afecta principalmente a la capacidad al permitir múltiples flujos de datos simultáneos a diferentes usuarios.
Beamforming	Afecta directamente a la cobertura al concentrar la energía de RF, extendiendo el alcance efectivo y mejorando la recepción de la señal para el usuario deseado.
Interferencia	Sube el umbral de cobertura y se reduce el radio útil; el efecto es crítico en borde de celda y, a menudo, más limitante en enlace ascendente.

Variable	Impacto
Canales de control y datos	Una gestión eficiente de estos canales permite una asignación de recursos más dinámica y una menor sobrecarga de señalización, liberando más recursos para el tráfico de datos.
HARQ	Afecta principalmente a la capacidad al garantizar la entrega exitosa de paquetes de datos a pesar de errores en el canal.
Modulación	Modulaciones de orden superior permiten transmitir más bits por símbolo, aumentando la tasa de datos y, por lo tanto, la capacidad.
Espaciado de subportadoras	Un espaciado más grande permite duraciones de símbolo más cortas, reduciendo la latencia. Un espaciado más pequeño ofrece mayor eficiencia espectral, aumentando la capacidad, pero es más susceptible a la dispersión de tiempo.
Configuración de antenas	Influye en la ganancia, la direccionalidad (a través del beamforming) y la capacidad para implementar técnicas MIMO.

Los valores de usabilidad ofrecidos en la figura 8 han sido obtenidos tras clasificar cada variable según una escala teórica que va de bajo a alto. Ese sencillo mapeo permite, de un vistazo, decidir cuáles parámetros hay que reforzar primero en las simulaciones si se quiere optimizar la eficiencia general de la red.

Xia y colaboradores examinaron el rendimiento del canal MIMO en frecuencias de 28 GHz y documentaron que la correlación espacial y la elección del esquema de modulación desempeñan un papel decisivo en la eficiencia del enlace. Su estudio también incorpora el impacto de la codificación, la modulación y el espaciado de subportadoras, lo que lo convierte en una referencia amplia y detallada [56].

Figura 8 Radar de usabilidad por generación



La figura 8 en particular sintetiza de manera visual los niveles de impacto teórico de cada variable clave analizada en este estudio. A través de una escala cualitativa, bajo, medio y alto, permite distinguir con claridad cuáles factores deben priorizarse en el modelado de las celdas con el propósito de optimizar el desempeño de las redes 5G. Muestra que variables como MIMO, beamforming y ancho de banda presentan una usabilidad alta que justifican su prioritaria inclusión en simulaciones. Contrastando esto, elementos como la codificación o el espaciado de subportadoras aunque relevantes, tienen un impacto variable. De esta forma facilita la toma de decisiones estratégicas sobre la configuración experimental que se realizó.

4.2.Simulación de celdas en diferentes escenarios

4.2.1. Entorno de desarrollo y herramientas

El entorno de simulación destinado al modelamiento de celdas 5G se construyó sobre NS-3, aprovechando la madurez de este simulador en la representación de redes celulares avanzadas. La elección de NS-3 se fundamenta en su habilidad para modelar de manera fiel los componentes de las arquitecturas 5G, así como en la disponibilidad de módulos ya implementados para 5G NR, los cuales permiten la incorporación de las últimas especificaciones de la 3GPP.

Tabla 6 Especificaciones del sistema de simulación

Nombre	Descripción
Sistema Operativo	Ubuntu 22.04 LTS (64-bit)
Procesador	AMD Ryzen 7 5700G with Radeon Graphics (3.80 GHz)
Memoria RAM	16 GB DDR4-3200
Almacenamiento	SSD NVMe 512 GB
Compilador	GCC 11.4.0 con optimización -O3
Versión NS-3	3.44
Módulo	5G LENA V4.0

4.2.1.1.Jerarquía de clases principales

Para organizar el código, se implementaron clases y módulos de soporte que permiten gestionar los distintos componentes del escenario:

Tabla 7 Funcionalidades de las clases implementadas en la simulación

Clase	Funcionalidad principal
ScenarioManager	Gestión de configuraciones de escenarios
ChannelModelManager	Manejo de modelos de propagación
TrafficGenerator	Generación de patrones de tráfico
MetricsCollector	Recolección y análisis de métricas
OutputManager	Gestión y exportación de resultados a CSV

4.2.2. Modelado de celdas

4.2.2.1. Configuración de red

La configuración de red constituye el primer paso en el modelado de escenarios de simulación, ya que define la estructura física y lógica del despliegue celular. En esta sección se establecen los parámetros relacionados con la disposición de las estaciones base (gNBs) y los equipos de usuario (UEs), tales como el número de celdas, la distancia inter-sitio (ISD) y la altura de las antenas.

Estos valores son determinantes porque condicionan la cobertura, la densidad de usuarios y la intensidad de la señal recibida en distintos entornos.

En particular, se consideraron escenarios densos urbanos y dispersos suburbanos, en los cuales la distancia efectiva entre sitios se ajusta para reflejar las condiciones reales de propagación. Asimismo, la altura de los gNBs y de los usuarios se seleccionó en concordancia con las especificaciones del 3GPP, garantizando realismo en la caracterización del enlace radioeléctrico.

Tabla 8 Parámetros de configuración del escenario de simulación

Parámetro	Valor
Numero de celdas	1,3,5,7 y 9
Distancia entre sitio	200 m
Distancia entre sitio efectivo en escenario denso	140 m
Distancia entre sitio efectivo en escenario disperso	260 m
Altura de la antena gNB	25 m
Altura usuario	1.5 m

4.2.2.2. Parámetros de radiofrecuencia y canal

En la configuración del sistema 5G simulado (Tabla 9) se adoptaron valores de referencia que responden a las recomendaciones del 3GPP (TS 38.104, TS 38.211, TR 38.901) y de la UIT-R (IMT-2020, M.2412), con el objetivo de garantizar que las simulaciones se ajusten a escenarios realistas de despliegue. La frecuencia central de 3.5 GHz corresponde a la banda C, priorizada a nivel mundial en el rango FR1 por su equilibrio entre cobertura y capacidad, mientras que el ancho de banda de 100 MHz es el máximo permitido en

dicho rango y refleja condiciones de alta capacidad en entornos densos. La potencia de transmisión del gNB (46 dBm) se seleccionó por ser representativa de estaciones base macro urbanas, asegurando amplia cobertura, en tanto que la potencia de transmisión del UE (26 dBm) corresponde al valor máximo de terminales clase 3 definido en el estándar, garantizando compatibilidad con dispositivos comerciales. La numerología $\mu = 2$ con espaciado de subportadoras de 60 kHz se eligió porque permite un balance entre baja latencia y eficiencia espectral, siendo idónea para FR1. En cuanto a los modelos de propagación, se emplearon UMa (Urban Macro) y RMa (Rural Macro), ambos definidos en el 3GPP TR 38.901, con el fin de representar condiciones realistas de propagación en entornos urbanos y rurales. Finalmente, la inclusión de beamforming realista, MIMO con feedback y flags CSI responde a la necesidad de modelar técnicas avanzadas de capa física que optimizan el rendimiento de la red.

Tabla 9 Parámetros de configuración del sistema 5G simulado

Parámetro	Valor
Frecuencia central	3.5 GHz
Banda de frecuencia	FR1
Ancho de banda	100 MHz
Potencia Tx gNB	46 dBm
Potencia Tx Ue	26 dBm
Numerología	2
Espaciado de subportadoras	60 kHz
Modelo de propagación denso	UMa
Modelo de propagación disperso	RMa
Beamforming	RealisticBeamformingAlgorithm
MIMO feedback	Habilitado
CSI flags	7

4.2.2.3. Configuración del planificador y núcleo de red

Además de los parámetros de radiofrecuencia y propagación, resulta indispensable definir la configuración asociada al esquema de planificación de recursos (scheduling) y al núcleo de red (EPC, Evolved Packet Core). Estos elementos determinan cómo se

distribuye la capacidad del canal entre los diferentes usuarios y cómo se enruta el tráfico hacia el exterior de la red de acceso.

En este trabajo se empleó un planificador con soporte de QoS tanto a nivel de scheduler principal como en el control lógico de canales, garantizando la diferenciación entre flujos eMBB y URLLC. Asimismo, se implementó un núcleo de red simplificado mediante NrPointToPointEpc, el cual proporciona conectividad de extremo a extremo a través de un enlace remoto configurado en términos de velocidad y latencia.

Tabla 10 Parámetros de planificación y núcleo de red

Parámetro	Valor
Scheduler	TdmaQos
Scheduler LC	NrMacSchedulerLcQos
EPC Helper	NrPointToPointEpc
Enlace remoto velocidad	100 Gbps
Tamaño de cola	1000 paquetes
Latencia de enlace remoto	1 ms

La configuración presentada permite simular un entorno en el cual el planificador de recursos gestiona eficientemente la asignación del espectro, respetando los requerimientos de calidad de servicio (QoS) propios de los diferentes tipos de tráfico. Por otra parte, el EPC simplificado garantiza que los flujos de datos generados en la red de acceso se transmitan hacia la red central con un retardo controlado, determinado por los parámetros de velocidad y latencia del enlace remoto. Esta integración asegura una aproximación realista al comportamiento de redes 5G desplegadas en entornos de producción.

Implementación de Scheduler TdmaQos

El scheduler TdmaQos implementado utiliza un algoritmo híbrido que combina las ventajas del Time Division Multiple Access (TDMA) con un sistema de priorización basado en Quality of Service (QoS). Este scheduler opera en dos fases principales: primero garantiza los requisitos mínimos para flujos con bitrate garantizado (GBR), y luego distribuye los recursos restantes según métricas de prioridad calculadas dinámicamente.

La métrica de prioridad se calcula considerando tres factores principales: el peso de prioridad según la clase QoS (donde URLLC tiene peso 1000, video streaming peso 100, y tráfico best-effort peso 1), el peso del retardo que incrementa exponencialmente para paquetes que han esperado más tiempo, y el peso del buffer que considera la cantidad de datos pendientes de transmisión.

Para la asignación de recursos, el sistema primero ordena todos los flujos activos según su métrica de prioridad, luego asigna los Resource Blocks (RBs) mínimos necesarios para cumplir con los garantías de bitrate de los flujos GBR, y finalmente distribuye los RBs restantes proporcionalmente según las prioridades calculadas, asegurando que los flujos URLLC mantengan acceso preferencial al medio de transmisión.

4.2.3. Configuración de generación de tráfico

4.2.3.1. Tráfico eMBB

Características del tráfico video streaming

El tráfico eMBB se modela basándose en patrones reales de streaming de video HD/4K, implementando un modelo de video streaming adaptativo que considera las variaciones naturales del contenido multimedia. Para escenarios densos, se configura una tasa media de Mbps, utilizando codec H.265 para máxima eficiencia de compresión, períodos de burst de 2 segundos seguidos de pausas de 100 milisegundos que simulan la variabilidad del contenido.

Tabla 11 Configuración de tráfico eMBB

Escenario	Tamaño de paquetes	Tasa de transferencia	Protocolo
Denso (UMa)	1400 bytes	5-20 Mbps	UDP
Disperso (RMa)	1400 bytes	5-20 Mbps	UDP

El tráfico eMBB se genera utilizando un modelo ON/OFF donde los períodos ON representan ráfagas de datos de video y los períodos OFF simulan pausas naturales en el contenido. Los paquetes tienen tamaño de 1400 bytes para maximizar la eficiencia sin

fragmentación IP, y se utiliza UDP como protocolo de transporte para minimizar la sobrecarga de retransmisiones.

4.2.3.2. Modelado de tráfico urllc

Características del tráfico de control industrial

El tráfico URLLC se diseña para simular aplicaciones de control industrial crítico, donde la confiabilidad y la baja latencia son fundamentales para la seguridad operacional. En escenarios densos, cada paquete URLLC tiene un payload de 100 bytes más 50 bytes de headers, transmitidos cada 1 milisegundo (1000 Hz).

Tabla 12 Configuración de tráfico URLLC

Escenario	Tamaño de paquetes	Tasa de paquetes
Denso (UMa)	100 bytes	2000 pps
Disperso (RMa)	100 bytes	1000 pps

Para escenarios dispersos, se incrementa el payload a 150 bytes para sensores más avanzados, se relaja el intervalo a 2 milisegundos (500 Hz), se permite jitter de hasta 0.2 ms y se mantiene confiabilidad del 99.99%. Esta diferenciación reconoce que en entornos menos congestionados se pueden implementar sensores más sofisticados con mayor cantidad de datos.

El modelo URLLC implementa transmisión periódica determinística para control de lazo cerrado, donde cada sensor debe reportar su estado en intervalos fijos. Adicionalmente, incorpora generación de eventos asíncronos para situaciones de alarma o cambios críticos que requieren notificación inmediata independientemente del ciclo regular.

Para garantizar la ultra-alta confiabilidad, se implementa un mecanismo de retransmisión limitado donde cada paquete puede retransmitirse máximo 2 veces en escenarios densos y 1 vez en dispersos. Si después de las retransmisiones el paquete no se entrega exitosamente, se registra como violación del SLA URLLC.

4.2.4. Distribución geográfica de usuarios

4.2.4.1. Algoritmos de posicionamiento

La distribución espacial de usuarios es crítica para obtener resultados realistas que reflejen escenarios de despliegue reales. En escenarios densos urbanos, se implementa una distribución exponencial concentrada que simula la alta densidad de usuarios cerca de las estaciones base, típica de centros urbanos donde la gente se concentra en edificios de oficinas, centros comerciales y áreas residenciales densas.

Para cada estación base gNB, se calcula el número de usuarios asignados, luego, cada usuario se posiciona utilizando una distribución exponencial con parámetro λ calculado para concentrar el 80% de los usuarios dentro del 40% del radio de cobertura. Esta distribución refleja la realidad donde la mayoría de los usuarios están relativamente cerca de la antena, con una cola larga de usuarios en el borde de celda.

Se establece una distancia mínima de 10 metros desde cualquier gNB para evitar condiciones irreales de muy alta potencia recibida. El algoritmo verifica que cada posición generada cumple con esta restricción antes de asignarla definitivamente.

En escenarios dispersos suburbanos, se utiliza distribución uniforme en un área extendida que simula entornos rurales o suburbanos donde los usuarios están más espaciados. El área de cobertura se extiende hasta el 80% del ISD con distancia mínima de 50 metros, reflejando el mayor espaciamiento típico en áreas suburbanas.

Para ambos escenarios, se implementa verificación de conectividad que asegura que todos los usuarios pueden conectarse a al menos una estación base con nivel de señal suficiente. Si un usuario queda fuera de cobertura, se reposiciona automáticamente hasta encontrar una ubicación válida.

4.2.4.2. Escenarios de simulación

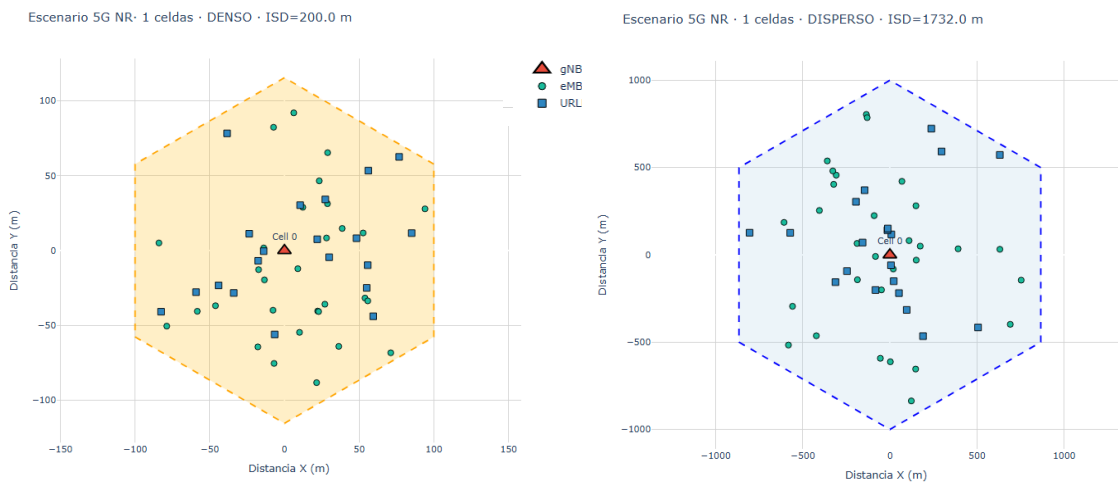
Con el propósito de evaluar el rendimiento de la red bajo distintas condiciones, se plantearon escenarios de simulación tanto densos como dispersos. En los escenarios densos, el Inter-Site Distance (ISD) se fijó en 200 metros, representando entornos urbanos donde la proximidad de las estaciones base permite una cobertura más compacta y mayores niveles de señal. Por su parte, los escenarios dispersos se configuraron con un ISD de 1732 metros, lo cual refleja condiciones rurales o de baja densidad, donde la cobertura es más amplia pero los usuarios se encuentran más alejados del gNB.

En cada escenario se desplegaron usuarios correspondientes a los servicios eMBB y URLLC, distribuidos aleatoriamente dentro del área de cobertura de las celdas. Se consideraron configuraciones de 1, 3, 5, 7 y 9 celdas, tanto en disposición densa como dispersa, con el fin de analizar la influencia de la topología y la distancia entre sitios sobre métricas clave de desempeño como throughput, latencia, jitter y pérdida de paquetes.

Escenario de 1 celda

El escenario de una celda constituye la configuración más simple, con un único gNB que brinda cobertura a usuarios eMBB y URLLC distribuidos aleatoriamente. En la variante densa se simula un entorno urbano compacto, sin presencia de interferencia intercelular, lo que permite establecer una línea base de referencia para el análisis de métricas de rendimiento. Por otro lado, en la variante dispersa se representa un entorno rural, donde la mayor distancia entre estación base y usuarios incrementa las pérdidas de propagación y plantea condiciones más exigentes para la conectividad, convirtiéndose en un punto de comparación fundamental frente a configuraciones más compactas.

Figura 9 Escenario de simulación con 1 celda en entorno denso y disperso

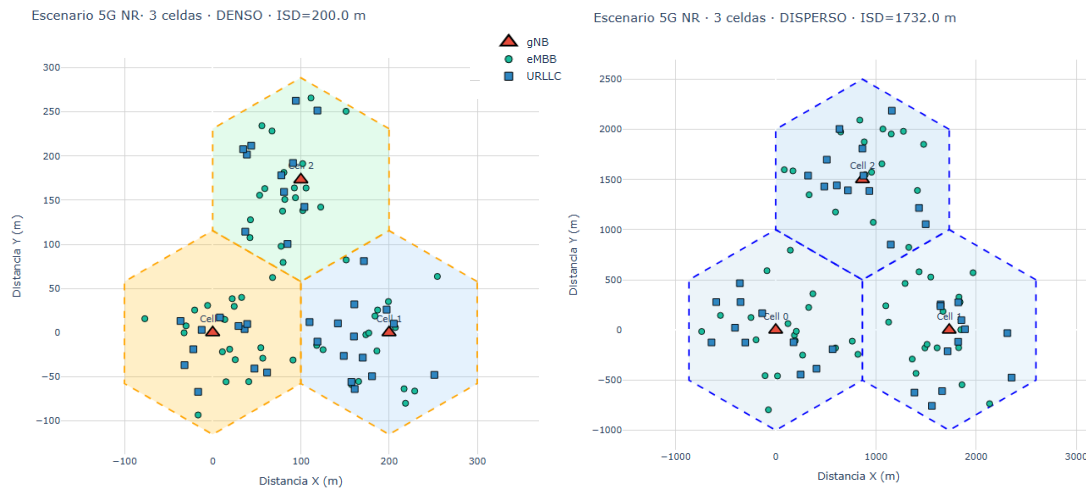


Escenario de 3 celdas

El escenario de tres celdas introduce un nivel adicional de complejidad al incorporar múltiples gNB distribuidos en disposición hexagonal, lo que permite observar los efectos de la interferencia intercelular y la movilidad de los usuarios entre áreas de cobertura. En la variante densa, los usuarios eMBB y URLLC se concentran en un entorno urbano compacto donde la proximidad entre estaciones base favorece la capacidad y la continuidad del servicio. En la variante dispersa, en cambio, se representa un entorno

rural con mayor separación entre celdas, lo que amplía la cobertura pero incrementa las pérdidas de propagación y el riesgo de zonas con menor calidad de señal.

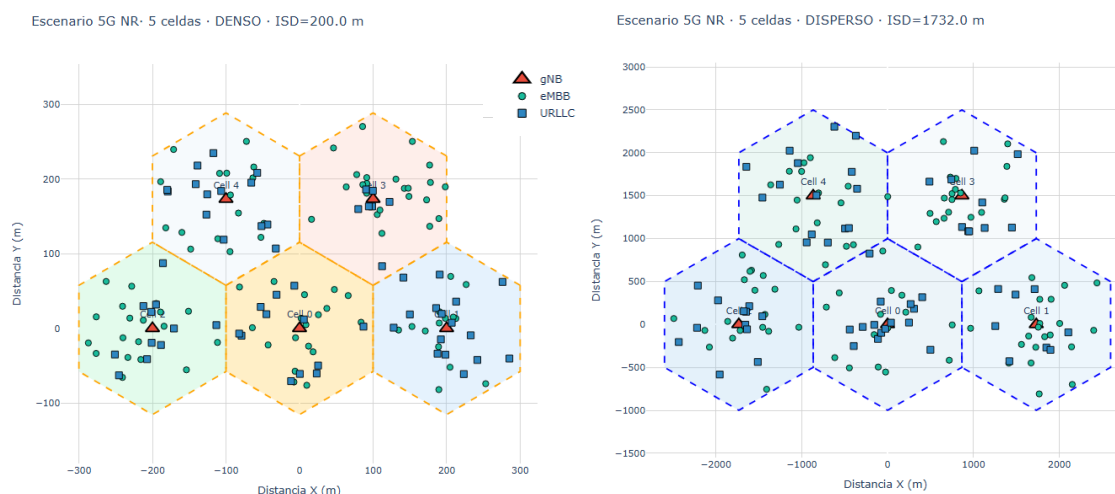
Figura 10 Escenario de simulación con 3 celdas en entorno denso y disperso



Escenario de 5 celdas

El escenario de cinco celdas representa una configuración intermedia que permite analizar de forma más detallada los efectos de la interferencia intercelular y el comportamiento de los usuarios en áreas con mayor solapamiento de cobertura. En la variante densa, los gNB se encuentran ubicados en proximidad, generando un entorno urbano donde la coexistencia de varias estaciones base incrementa la capacidad disponible, pero también exige una gestión más eficiente de los recursos radioeléctricos debido a la mayor superposición de señales. En la variante dispersa, la disposición de las cinco celdas cubre una zona extensa con menor densidad de infraestructura, lo que asegura cobertura en espacios rurales amplios, aunque con una mayor sensibilidad a la degradación de la señal y a la variabilidad en la experiencia de los usuarios.

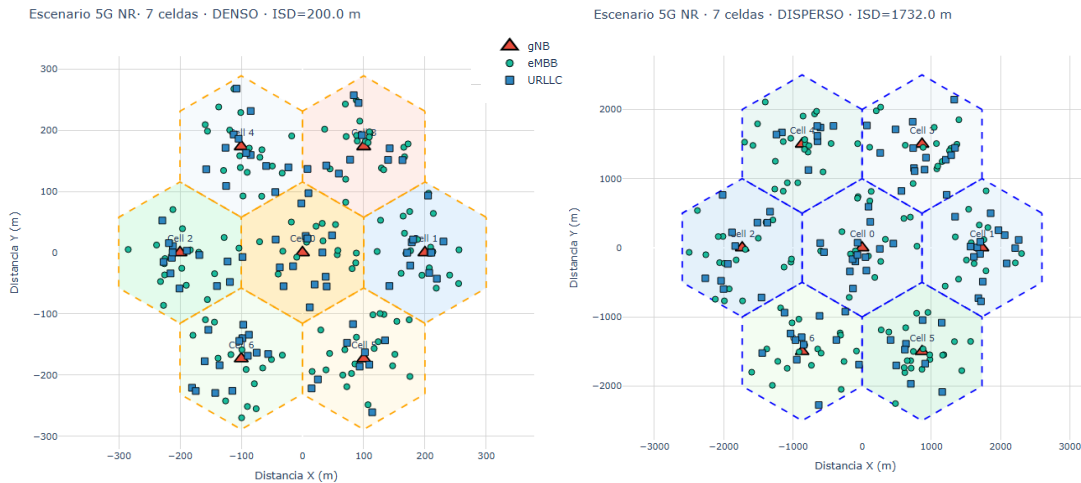
Figura 11 Escenario de simulación con 5 celdas en entorno denso y disperso



Escenario de 7 celdas

El escenario de siete celdas corresponde a una topología clásica en redes móviles, donde un gNB central se encuentra rodeado por seis estaciones base, formando un patrón hexagonal completo. En la variante densa, se representa un entorno urbano con alta concentración de usuarios eMBB y URLLC, donde la superposición de coberturas genera elevados niveles de interferencia, pero también asegura continuidad de servicio y disponibilidad de múltiples puntos de acceso. En la variante dispersa, la disposición de las siete celdas se extiende sobre un área mucho mayor, propia de entornos rurales o de baja densidad, garantizando cobertura en amplios espacios aunque con mayores retos relacionados con la propagación de la señal y la consistencia de la calidad de servicio.

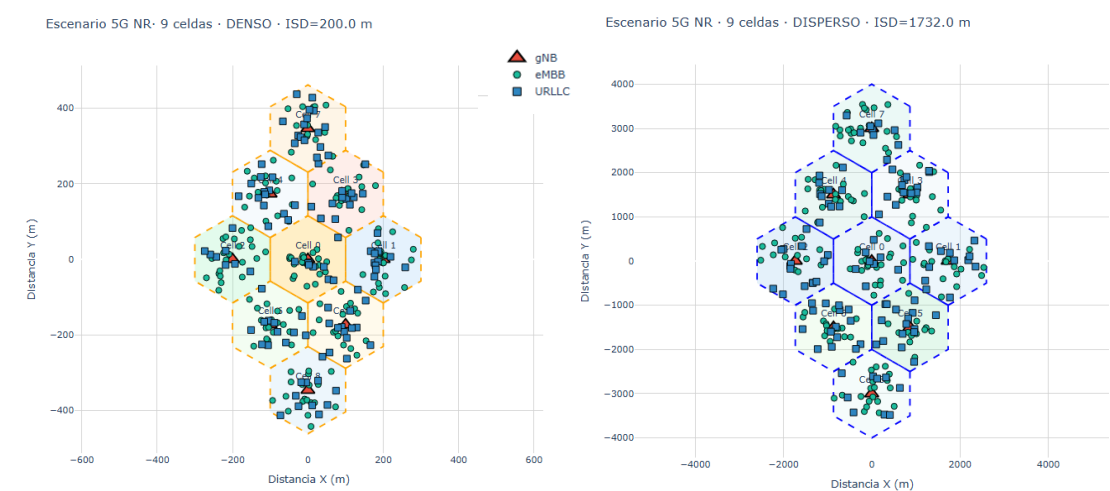
Figura 12 Escenario de simulación con 7 celdas en entorno denso y disperso



Escenario de 9 celdas

El escenario de nueve celdas constituye la configuración más amplia del conjunto de simulaciones, integrando un nodo central rodeado por ocho estaciones base que conforman una malla más extensa. En la variante densa, se reproduce un entorno urbano con alta concentración de celdas y usuarios eMBB y URLLC, donde la superposición de cobertura es significativa, lo que permite analizar condiciones críticas de interferencia y gestión de recursos. En la variante dispersa, las nueve celdas se distribuyen sobre un área de gran extensión, representando un escenario rural en el que se garantiza la conectividad en regiones amplias, aunque con mayor exposición a pérdidas de propagación y variabilidad en la calidad del servicio.

Figura 13 Escenario de simulación con 9 celdas en entorno denso y disperso



4.2.5. Resultados de 1 celda

Tabla 13 Resultados de desempeño de 1 celda en escenarios UMA y RMa

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
Throughput total	80.71	216.28	Mbps
Throughput promedio/UE	1.79	7.20	Mbps
Paquetes transmitidos	612,923	291,865	-
Paquetes recibidos	388,423	291,824	-
Pérdida de paquetes	224,500	41	-
Pérdida de paquetes	36,6	0,014	%
Latencia promedio URLLC	1.30	1.09	ms
Latencia promedio eMBB	9.43	1.56	ms
Jitter	0,48	0,13	ms
SINR promedio	77.23	66.8	dB
Eficiencia espectral	0.807	2.162	bps/Hz/cell

Dentro de una sola celda, ambos escenarios exhiben un comportamiento radicalmente diferente. En áreas urbanas densas (UMA), el sistema entrega un rendimiento total de 80.7 Mbps con un promedio por usuario de 1.79 Mbps y una eficiencia espectral de 0.807 bps/Hz/celda. La latencia para flujos críticos de URLLC se mantiene alrededor de 1.30 ms, pero para el tráfico de eMBB, hay un retraso atípico de 9.43 ms, indicativo de colas largas y congestión en un único punto de acceso. Esta congestión también se refleja en la calidad de los datos; la agregación de flujos muestra alrededor de 612 mil paquetes transmitidos y 388 mil paquetes recibidos con aproximadamente 224 mil paquetes perdidos, lo que da una tasa de pérdida de aproximadamente 36.6%. A pesar de que la fluctuación promedio es baja (~ 0.48 ms), la demora agregada en eMBB junto con las pérdidas hace que la fiabilidad práctica sea baja para aplicaciones de alta tasa sostenida. Es muy probable que haya una causa estructural, donde demasiados usuarios compiten por un único programador y enlace, de modo que incluso pequeños picos de tráfico o ligeros cambios en la radio se traducen en colas y pérdidas.

En el escenario de macro rural (RMa) con una sola celda, el comportamiento se invierte. El sistema logra un rendimiento total de 216.3 Mbps, y 7.20 Mbps por usuario, lo que produce una eficiencia espectral de 2.163 bps/Hz/celda. Las latencias se mantienen estables y bajas, aproximadamente 1.09 ms para URLLC, 1.56 ms para eMBB. En el plano de datos, el rendimiento es casi impecable: de 291,865 paquetes transmitidos se reciben 291,824, con solo 41 perdidos, lo que genera una tasa de pérdida del orden de 0.014%. Este contraste sugiere que, con una sola celda, la distribución espacial de usuarios de RMa reduce la contención de usuarios y la interferencia intracelular, mejorando la estabilidad del servicio.

El análisis indica que una sola celda en un entorno denso concentra demasiado la demanda y penaliza la experiencia de eMBB. En un entorno más disperso, la menor restricción, así como un radio de sector menos agresivo, mantienen el rendimiento y la fiabilidad.

4.2.6. Resultados de 3 celdas

Tabla 14 Resultados de desempeño de 3 celdas en escenarios UMA y RMa

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
Throughput total	342.9	210.1	Mbps
Throughput promedio/UE	7.62	7.0	Mbps
Paquetes transmitidos	612051	291318	-
Paquetes recibidos	611990	272837	-
Pérdida de paquetes	61	18481	-
Pérdida de paquetes	0.01	6.34	%
Latencia promedio URLLC	1.06	1.00	ms
Latencia promedio eMBB	1	9.14	ms
Jitter	0.19	0.36	ms
SINR promedio	64.4	45.6	dB
Eficiencia espectral	1.143	0.7	bps/Hz/cell

En el escenario de tres celdas, el rendimiento mejora significativamente en comparación con la configuración de una sola celda, particularmente en el entorno UMA. En el caso de la densa urbe, el rendimiento total alcanza 342.9 Mbps, con un promedio de 7.62 Mbps por usuario y una eficiencia espectral de 1.143 bps/Hz/celda. El plano de datos indica una estabilidad sobresaliente: de más de 612,000 paquetes transmitidos, todos menos 61 son recibidos con éxito, lo que corresponde a una tasa de pérdida de solo 0.01%. Las latencias se mantienen muy bajas y consistentes: el tráfico urllc (1.04 ms) y eMBB (1.02 ms) son ambos bajos; el retraso promedio global es de 1.03 ms con solo 0.19 ms de fluctuación. El SINR promedio se sitúa en 64.4 dB, indicando un canal de alta calidad. Estos resultados muestran que con tres celdas en un entorno urbano, el sistema es capaz de

equilibrar la carga de manera uniforme sin la congestión observada en el escenario de una sola celda.

Por otro lado, el escenario RMa con tres celdas muestra una deficiencia de rendimiento más crítica. El rendimiento total es de 210.1 Mbps, generando 7.00 Mbps por usuario y una eficiencia espectral de 0.700 bps/Hz/celda, notablemente peor que UMA. Aunque el número de paquetes transmitidos fue de 291,318, solo se recibieron 272,837 paquetes, con una pérdida acumulada de 18,481, lo que corresponde a una tasa de pérdida del 6.34%. Esta pérdida es el factor más pronunciado responsable del aumento observado en la métrica de latencia eMBB, que se encuentra en el rango atípico de 9.14 ms, mientras que la latencia URLLC permanece alrededor de 1.01 ms.

En términos prácticos, esto significa que en un entorno urbano con tres celdas el sistema puede sostener servicios de alta demanda con estabilidad, mientras que en entorno disperso las limitaciones de propagación y la mayor dispersión espacial generan retransmisiones y degradación en la experiencia de los usuarios.

4.2.7. Resultados de 5 celdas

Tabla 15 Resultados de desempeño de 5 celdas en escenarios UMA y RMa

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
Throughput total	342.9	216.3	Mbps
Throughput promedio/UE	7.62	7.21	Mbps
Paquetes transmitidos	614625	291256	-
Paquetes recibidos	614554	291206	-
Pérdida de paquetes	71	50	-
Pérdida de paquetes	0.01	0.01	%
Latencia promedio URLLC	1.00	1.44	ms
Latencia promedio eMBB	1.00	1.15	ms
Jitter	0.20	0.34	ms

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
SINR promedio	52.9	40.8	dB
Eficiencia espectral	0.686	0.433	bps/Hz/cell

En el contexto de un plano de cinco celdas, tanto el entorno UMA como el RMa exhiben un comportamiento más equilibrado y menos vulnerable que en estructuras de menor magnitud, aunque los niveles de rendimiento continúan distinguiéndose de manera relevante entre ambos. La configuración de uso urbano denso reporta un throughput total de 342.9 Mbps y un promedio de 7.62 Mbps por estación de usuario, complementado por una eficiencia espectral de 0.686 bps/Hz/celda. Durante la etapa de transmisión, se difundieron 614,625 paquetes en el plano de datos, de los cuales 614,554 llegaron a su destinatario. La cifra de 71 paquetes omitidos, que representa una tasa de pérdida de 0.012%, muestra que las anulaciones se mantienen en márgenes negligibles. Las latencias se caracterizan por niveles bajos y uniformes, 1.01 ms para servicios URLLC y 1.05 ms para eMBB, lo que origina un retardo medio de 1.03 ms y un jitter a 0.20 ms. La media del índice de relación señal a interferencia más ruido se cuantifica en 52.9 dB. La coincidencia de estas magnitudes avala a la arquitectura UMA la capacidad de suministrar, dentro de un entorno de cinco celdas, un servicio de notable robustez, pérdida limitada y latencias conformes a los requerimientos de aplicaciones críticas frente a demora.

En el perfil RMa, el rendimiento global revela un throughput total que se sitúa en 216,3 Mbps y un throughput medio asignado a cada usuario equivalente a 7,21 Mbps. La eficiencia espectral se establece en 0,433 bps/Hz/celda. El sistema, durante el intervalo de análisis, transmitió 291.256 paquetes y registró 291.206 recepciones, produciendo un total de 50 pérdidas, que equivale a una tasa de pérdida de 0,017%. Aunque la cifra se define como baja, la métrica de latencia exhibe un ligero incremento, alcanzando 1,44 ms en el modo URLLC y 1,15 ms en el modo eMBB, reportando un retardo medio de 1,26 ms y un jitter de 0,34 ms. El SINR medio global se estima en 40,8 dB. En conjunto, estos resultados demuestran un nivel aceptablemente estable del sistema

4.2.8. Resultados de 7 celdas

Tabla 16 Resultados de desempeño de 7 celdas en escenarios UMA y RMa

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
Throughput total	342.8	216.3	Mbps
Throughput promedio/UE	7.62	7.21	Mbps
Paquetes transmitidos	611542	290452	-
Paquetes recibidos	610929	290380	-
Pérdida de paquetes	613	72	-
Pérdida de paquetes	0.1	0.02	%
Latencia promedio URLLC	7.78	1.16	ms
Latencia promedio eMBB	2.20	2.15	ms
Jitter	0.39	0.38	ms
SINR promedio	42.7	38.0	dB
Eficiencia espectral	0.49	0.433	bps/Hz/cell

En el escenario de siete celdas, el rendimiento agregado se preserva en niveles competitivos, aunque se evidencia una variabilidad simultánea atribuible a la distribución espacial de clientes. En el modo urbano denso (UMA), el sistema genera un throughput total de 342.8 Mbps, el promedio por usuario se cifra en 7.62 Mbps, y la eficiencia espectral se determina en 0.49 bps/Hz/celda. Se registra una tasa de pérdida nominal, de aproximadamente 0.10%, y el jitter medio se mantiene controlado en 0.39 ms. A pesar de estos indicadores, la latencia presenta un comportamiento inconsistente; el segmento eMBB alcanza valores razonables de 2.20 ms, mientras que el segmento URLLC se manifiesta en un incremento atípico a 7.78 ms. Tal desviación no se asocia a una pérdida catastrófica de paquetes, sino a la configuración de la distribución de usuarios a lo largo de la simulación. Una inspección de la asignación evidencia que algunas celdas recibieron

más usuarios que otras, desencadenando congestión y colas extensas en ciertas ubicaciones y, en consecuencia, elevando la latencia crítica que afecta a los flujos URLLC.

Ante la anomalía observada, se realizó una segunda ejecución con una semilla diferente con el fin de evaluar la estabilidad de los resultados.

Tabla 17 Resultados de desempeño de 7 celdas en escenarios UMA y RMa: semilla 2

Variable	UMA (denso)	Unidad
Throughput total	342.8	Mbps
Throughput promedio/UE	7.62	Mbps
Paquetes transmitidos	611190	-
Paquetes recibidos	611073	-
Pérdida de paquetes	117	-
Pérdida de paquetes	0.01	%
Latencia promedio URLLC	1.2	ms
Latencia promedio eMBB	1.6	ms
Jitter	0.36	ms
SINR promedio	41.7	dB
Eficiencia espectral	0.49	bps/Hz/cell

Empleando la semilla 2, el throughput total se mantuvo de forma consistente en aproximadamente 343 Mbps, mientras el throughput promedio por usuario se estabilizó en 7,6 Mbps. La latencia en el modo URLLC, en cambio, presentó una mejora sustancial, acotándose a un rango de 1 a 2 ms, con la eliminación del valor atípico previamente detectado. La causa subyacente fue una redistribución en la asignación de recursos que

atenuó la congestión, favoreciendo una distribución más equilibrada de los usuarios entre las celdas.

En el escenario RMa de siete celdas, el throughput total alcanzó los 216.3 Mbps, con un promedio de 7.21 Mbps por usuario y una eficiencia espectral de 0.309 bps/Hz/celda. Las pérdidas se mantuvieron en un nivel bajo (0.025%), y las latencias presentaron un comportamiento más estable: 1.16 ms en URLLC y 2.15 ms en eMBB. El jitter rondó los 0.38 ms y el SINR promedio fue de 38 dB, inferior al de UMA debido a mayores distancias de propagación. Al revisar los resultados con diferentes semillas, se confirmó que el patrón de latencias en RMa no sufre picos abruptos como en UMA.

4.2.9. Resultados de 9 celdas

Tabla 18 Resultados de desempeño de 9 celdas en escenarios UMA y RMa

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
Throughput total	342.8	215.9	Mbps
Throughput promedio/UE	7.62	7.20	Mbps
Paquetes transmitidos	612914	291654	-
Paquetes recibidos	612857	290590	-
Pérdida de paquetes	87	1064	-
Pérdida de paquetes	0.01	0.3	%
Latencia promedio URLLC	1.02	13.9	ms
Latencia promedio eMBB	1.3	10.3	ms
Jitter	0.24	0.64	ms
SINR promedio	42.8	30.4	dB
Eficiencia espectral	0.381	0.2240	bps/Hz/cell

En la simulación con nueve celdas, los resultados muestran un contraste claro entre el escenario UMA y el RMa. En UMA, el sistema alcanzó un throughput total de alrededor de 342.8 Mbps con un promedio por usuario de 7.62 Mbps y una eficiencia espectral de 0.381 bps/Hz/celda. Las pérdidas de paquetes fueron mínimas ($\approx 0.01\%$) y las latencias se mantuvieron en valores bajos: aproximadamente 1.02 ms para URLLC y 1.34 ms para eMBB.

En el escenario correspondiente a RMa con una configuración de nueve celdas, el rendimiento global se vio limitado a un throughput agregando de 215.9 Mbps. Este valor se traduce en un throughput medio por usuario de 7.2 Mbps, asociado a una eficiencia espectral de 0.22 bps/Hz por celda. El principal fenómeno adverso observado se relaciona con el incremento de las latencias, que alcanzaron picos de 13.9 ms en el modo URLLC y de 10.3 ms en el modo eMBB. Aunque la tasa de pérdida de paquetes se mantuvo en niveles relativamente bajos, la cuantificación de latencia sugiere que el servicio es potencialmente inadecuado para aplicaciones con estrictos requisitos de latencia. El análisis del entorno reveló que la mayor parte de los usuarios se situaba en posiciones de borde, trasladándose a distancias superiores a 70 metros de la celda más cercana. Esta disposición moderó el SINR y, consecuentemente, aumentó el número de retransmisiones, induciendo a la vez la formación de colas y el incremento de la latencia.

Para verificar la estabilidad del modelo y descartar la posibilidad de que el comportamiento extremo observado tuviera origen estructural, se ejecutó una segunda simulación con la semilla 2, concentrándose en el escenario RMa.

Tabla 19 Resultados de desempeño de 9 celdas en escenarios UMA y RMa: semilla 2

Variable	RMa (disperso)	Unidad
Throughput total	215.9	Mbps
Throughput promedio/UE	7.20	Mbps
Paquetes transmitidos	291200	-
Paquetes recibidos	290930	-
Pérdida de paquetes	270	-

Variable	RMa (disperso)	Unidad
Pérdida de paquetes	0.09	%
Latencia promedio URLLC	4.6	ms
Latencia promedio eMBB	1.1	ms
Jitter	0.38	ms
SINR promedio	37.2	dB
Eficiencia espectral	0.2240	bps/Hz/cell

La simulación adicional indicó un throughput total de 215.9 Mbps, con una media de 7.20 Mbps por usuario, confirmando la consistencia de la capacidad. Las latencias experimentaron una disminución notable respecto a la simulación con semilla 1: se registraron 4.60 ms en URLLC y 1.14 ms en eMBB y un jitter de 0.385 ms. La tasa de pérdida se mantuvo en un nivel bajo (0.093%), mientras que el SINR promedio obtuvo el orden de 37 dB, corroborando la naturaleza dispersa de la población.

Estos resultados evidencian que, bajo el escenario RMa, el throughput presenta variación marginal entre diferentes simulaciones, mientras que la distribución espacial de los usuarios definida por la semilla impacta de manera determinante en la latencia y la confiabilidad.

Una vez caracterizado el rendimiento, se consideró pertinente explorar escenarios con una carga reducida de usuarios, con el fin de analizar la respuesta del sistema en condiciones de menor congestión y validar la consistencia de las tendencias observadas.

4.2.10. Simulación con menor carga de usuarios

Se llevaron a cabo simulaciones suplementarias en las que se redujo deliberadamente el número total de dispositivos conectados. Se configuró un total de 15 UEs en el entorno UMA y 10 UEs en el entorno RMa. Esta elección de carga tiene como objetivo examinar el comportamiento de la arquitectura del sistema bajo condiciones de congestión reducida, cuantificando el impacto que experimentan métricas esenciales como el

throughput, la eficiencia espectral y la latencia a medida que se produce una disminución abrupta en el número de usuarios activos. De este modo, se busca validar la solidez de las tendencias previamente detectadas en las simulaciones de mayor densidad así como confrontar, de forma homogénea, tales resultados con situaciones caracterizadas por una menor demanda de tráfico.

Tabla 20 Resultados de desempeño de 1 celda en escenarios UMA y RMa con menor carga de usuarios

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
Throughput total	214.23	145.86	Mbps
Throughput promedio/UE	14.28	14.58	Mbps
Paquetes transmitidos	273068	150750	-
Paquetes recibidos	273042	150738	-
Pérdida de paquetes	26	12	-
Pérdida de paquetes	0.009	0.007	%
Latencia promedio URLLC	0.935	0.841	ms
Latencia promedio eMBB	0.909	0.828	ms
Jitter	0.10	0.07	ms
SINR promedio	77.12	65.35	dB
Eficiencia espectral	2.14	1.45	bps/Hz/cell

Con menor carga, ambos escenarios sostienen rendimientos altos y latencias extremadamente bajas. Las pérdidas son ínfimas, el retardo medio ronda 0.83–0.92 ms y el jitter 0.08–0.10 ms. Estos resultados confirman que, al reducir la cantidad de usuarios, desaparecen los cuellos de botella observados en escenarios cargados y se estabilizan las métricas temporales sin penalizaciones de calidad.

Luego de analizar el comportamiento del sistema en el escenario de una celda, se amplió la simulación a un entorno de tres celdas, con el objetivo de observar cómo la interacción multicelda y la mayor disponibilidad de recursos influyen en la distribución del tráfico y en los indicadores de rendimiento. De este modo, el escenario funciona como puente entre el sistema de referencia de una sola celda y las topologías de cinco, siete y nueve celdas, habilitando una valoración progresiva del impacto de la agregación de estaciones sobre las métricas de interés. De este modo, el escenario de 3 celdas funciona como puente entre el sistema de referencia de una sola celda y las topologías de cinco, siete y nueve celdas, habilitando una valoración progresiva del impacto de la agregación de estaciones sobre las métricas de interés.

Tabla 21 Resultados de desempeño de 3 celdas en escenarios UMA y RMa con menor carga de usuarios

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
Throughput total	214.23	145.86	Mbps
Throughput promedio/UE	14.28	14.58	Mbps
Paquetes transmitidos	270795	151470	-
Paquetes recibidos	270768	151456	-
Pérdida de paquetes	27	14	-
Pérdida de paquetes	0.009	0.009	%
Latencia promedio URLLC	0.796	0.954	ms
Latencia promedio eMBB	0.878	1.04	ms
Jitter	0.09	0.223	ms
SINR promedio	65.79	50.12	dB
Eficiencia espectral	0.714	0.486	bps/Hz/cell

En el escenario de tres celdas con entorno urbano denso (UMA), se observa un sistema equilibrado que distribuye de forma eficiente los recursos y mantiene estabilidad en las métricas de desempeño. El throughput y la eficiencia espectral se comportan de manera consistente con la mayor disponibilidad de celdas, mientras que las latencias y el jitter permanecen en rangos reducidos, lo que garantiza la compatibilidad con aplicaciones sensibles al retardo. Las pérdidas de paquetes resultan mínimas y el nivel de SINR se mantiene elevado, lo que respalda una buena calidad de enlace.

Por el contrario, en el escenario rural macro (RMa) con tres celdas, si bien las métricas temporales se sostienen en niveles bajos y no representan un problema para la transmisión de datos, la propagación dispersa propia del entorno genera un impacto más fuerte en la calidad de señal y en la robustez del enlace.

Como resultado del análisis de desempeño en configuraciones de una y tres celdas, la experimentación continuó con un entorno de cinco celdas, una topología que actúa como escenario medio y que facilita la observación del comportamiento del sistema a medida que se incrementa la densidad de estaciones base.

Tabla 22 Resultados de desempeño de 5 celdas en escenarios UMA y RMa con menor carga de usuarios

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
Throughput total	214.23	145.87	Mbps
Throughput promedio/UE	14.28	14.59	Mbps
Paquetes transmitidos	271413	149927	-
Paquetes recibidos	271388	149911	-
Pérdida de paquetes	25	16	-
Pérdida de paquetes	0.009	0.01	%
Latencia promedio URLLC	1.07	1.72	ms
Latencia promedio eMBB	0.91	0.85	ms

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
Jitter	0.16	0.30	ms
SINR promedio	53.5	41.8	dB
Eficiencia espectral	0.428	0.292	bps/Hz/cell

En el escenario UMA con cinco celdas, el sistema opera de forma estable y reproduce la tendencia observada en despliegues previos. La densidad incrementada de estaciones base favorece la repartición de la carga, resultando en un throughput elevado y en una eficiencia espectral proporcional a la complejidad de la topología. Las métricas de latencia y jitter permanecen en valores bajos y consistentes, asegurando continuidad en servicios críticos respecto al retardo. Las pérdidas de paquetes se mantienen en cifras cercanas a cero, y la calidad de señal se conserva en óptimos niveles, lo que se traduce en una gratificante experiencia para el usuario.

En contraste, en el escenario RMa con cinco celdas, el rendimiento general es más limitado debido a las condiciones de propagación y la mayor dispersión de usuarios. La eficiencia espectral desciende en comparación con el entorno urbano, y el throughput por usuario se mantiene equilibrado. Aun así, los tiempos de latencia y jitter se mantienen dentro de niveles adecuados, lo que permite sostener servicios con requerimientos estrictos en cuanto a retardo. La calidad de señal, reflejada en el SINR promedio, resulta menos robusta que en UMA, lo que explica la reducción en la confiabilidad. De manera general, el escenario RMa con cinco celdas logra un desempeño suficiente para garantizar continuidad de servicio, aunque condicionado por las limitaciones propias del entorno disperso.

Tabla 23 Resultados de desempeño de 7 celdas en escenarios UMA y RMa con menor carga de usuarios

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
Throughput total	214.23	145.87	Mbps
Throughput promedio/UE	14.28	14.59	Mbps

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
Paquetes transmitidos	271954	151876	-
Paquetes recibidos	271929	151854	-
Pérdida de paquetes	25	22	-
Pérdida de paquetes	0.009	0.01	%
Latencia promedio URLLC	0.93	1.17	ms
Latencia promedio eMBB	1.02	1.37	ms
Jitter	0.19	0.38	ms
SINR promedio	51.5	44.7	dB
Eficiencia espectral	0.306	0.208	bps/Hz/cell

En entornos urbanos de alta densidad (UMA), la disposición de siete celdas proporciona un rendimiento uniforme: se distribuyen los usuarios de manera equilibrada, la latencia permanece baja y las pérdidas son mínimas. Esto resulta en una experiencia de usuario satisfactoria y un nivel de fiabilidad aceptable. Por contra, al trasladar la prueba al entorno rural de gran extensión (RMa), la latencia sigue siendo aceptable, pero la eficiencia espectral y la calidad de señal se deterioran notablemente, lo que merma la fiabilidad. Por lo tanto, las conclusiones son que en UMA el sistema se comporta de manera más estable y equilibrada, mientras que en RMa la dispersión geográfica y las largas distancias dificultan la coherencia del servicio.

Al concluir la simulación, se analizó la configuración de nueve celdas, la cual es la superior dentro de las topologías que se tenían programadas. Esta opción se asocia con un enfoque de densidad máxima de estaciones base, permitiendo así observar el comportamiento de alto tráfico que podría darse en un entorno urbano consolidado. El estudio brinda, por consiguiente, un panorama exhaustivo de la viabilidad de la red en condiciones de sobrecarga.

Tabla 24 Resultados de desempeño de 9 celdas en escenarios UMA y RMa con menor carga de usuarios

Variable	UMA (denso)	RMa (disperso)	Unidad
Throughput total	214.23	145.86	Mbps
Throughput promedio/UE	14.28	14.59	Mbps
Paquetes transmitidos	271786	151301	-
Paquetes recibidos	271754	151284	-
Pérdida de paquetes	32	17	-
Pérdida de paquetes	0.01	0.01	%
Latencia promedio URLLC	0.93	0.91	ms
Latencia promedio eMBB	1.02	1.26	ms
Jitter	0.20	0.33	ms
SINR promedio	44.8	44.7	dB
Eficiencia espectral	0.238	0.162	bps/Hz/cell

En el escenario urbano denso (UMA), la red con nueve celdas mantiene buen rendimiento y latencias bajas, aunque con una ligera disminución en la eficiencia espectral y en la confiabilidad debido a la complejidad multicelda. En el entorno rural macro (RMa), las métricas de retardo siguen siendo aceptables, pero el throughput y la confiabilidad se ven más afectados por la dispersión y mayores distancias de cobertura. En conjunto, UMA ofrece un desempeño más estable, mientras que en RMa se evidencian con mayor claridad las limitaciones del entorno.

4.2.11. Discusión

En la investigación realizada por China Mobile se demostró, a través de pruebas de campo en 3.5 GHz, que la numerología flexible en 5G NR (15, 30 y 60 kHz en bandas sub-6

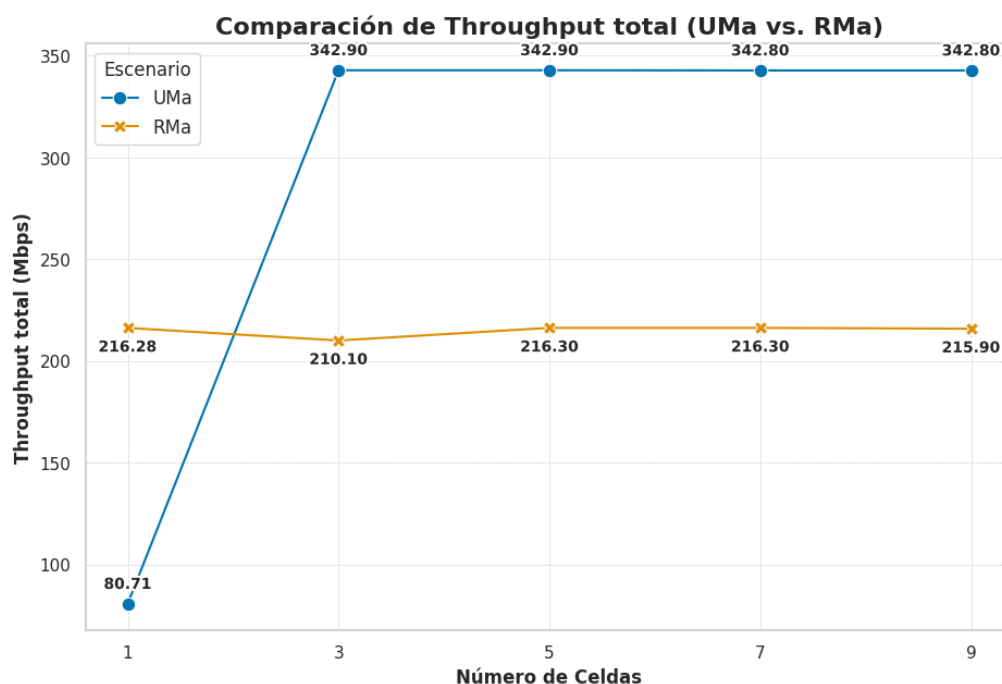
GHz) influye de manera directa en el rendimiento del canal: un espaciado mayor de subportadoras incrementa la tolerancia al Doppler y reduce la latencia, mientras que un espaciado menor proporciona mayor robustez frente a la interferencia por multitrayectoria pero penaliza el retardo [51]. En la presente investigación se observó este mismo comportamiento, en la configuración inicial con 30 kHz se obtuvo una latencia superior, lo que afectaba especialmente a los servicios URLLC; por ello, se optó por realizar la simulación con 60 kHz (numerología 2), logrando una disminución de la latencia y una mayor adecuación a los requisitos de calidad de servicio en FR1.

4.3.Comparación del rendimiento de las celdas

Comparación del throughput

En el escenario UMA, el rendimiento con una sola celda es muy bajo debido a la saturación de recursos, pero al pasar a tres celdas el sistema logra un salto considerable y a partir de allí se estabiliza en torno a los 343 Mbps, manteniéndose prácticamente constante en cinco, siete y nueve celdas. Esta estabilidad se explica porque el presupuesto de tráfico definido en la configuración establece un límite máximo que la red no puede superar, de modo que añadir más celdas ya no eleva el caudal agregado. En el caso de RMa, el throughput se mantiene prácticamente plano alrededor de los 210 a 216 Mbps en la mayoría de las configuraciones, con una ligera caída en tres celdas, lo que indica que en entornos rurales la capacidad está condicionada más por la calidad de enlace y las distancias que por el número de estaciones desplegadas.

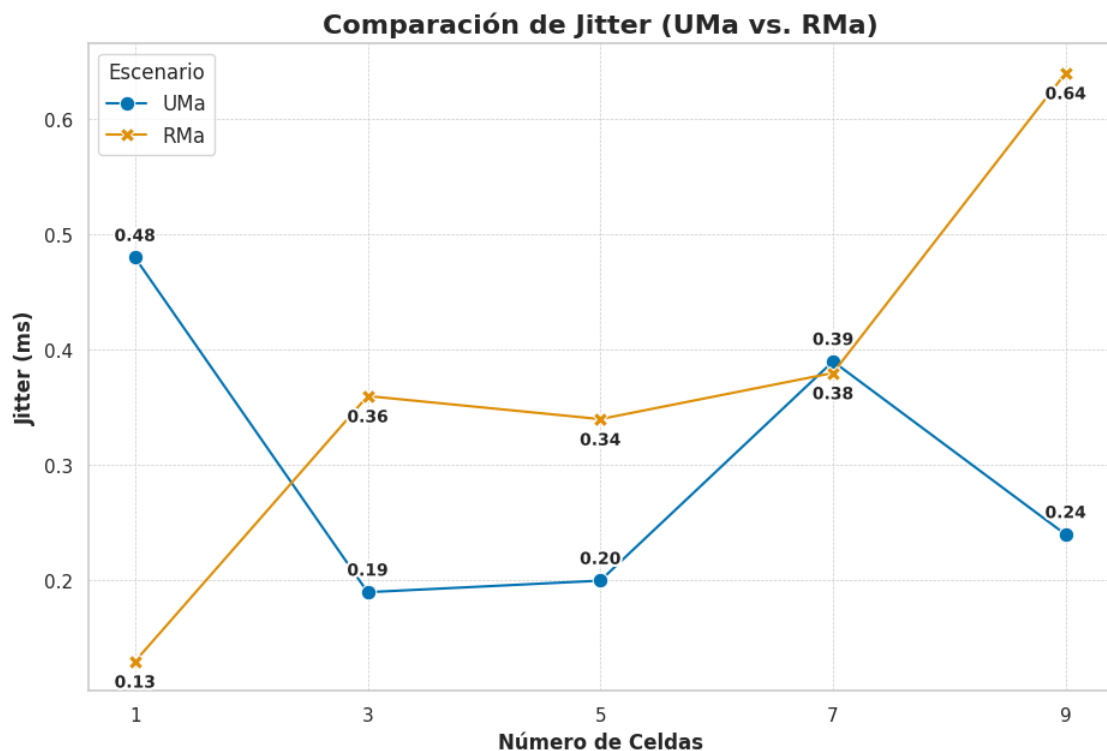
Figura 14 Relación del throughput entre escenarios y números de celdas



Comparación del jitter

En UMA se observa un valor inicial elevado con una celda, que desciende de forma marcada al utilizar tres y cinco celdas, señal de que la red gana estabilidad en la entrega de paquetes. Sin embargo, en siete celdas aparece un repunte antes de volver a mejorar en nueve, lo que se puede asociar con una asignación no homogénea de usuarios o con la interferencia intercelda propia de esa geometría. En RMa, por el contrario, el jitter es bajo con una celda y va aumentando a medida que crece el número de estaciones, alcanzando el máximo en nueve celdas, lo que refleja la mayor variabilidad temporal introducida por interferencia y distancias más largas en un entorno disperso.

Figura 15 Relación del jitter entre escenarios y números de celdas

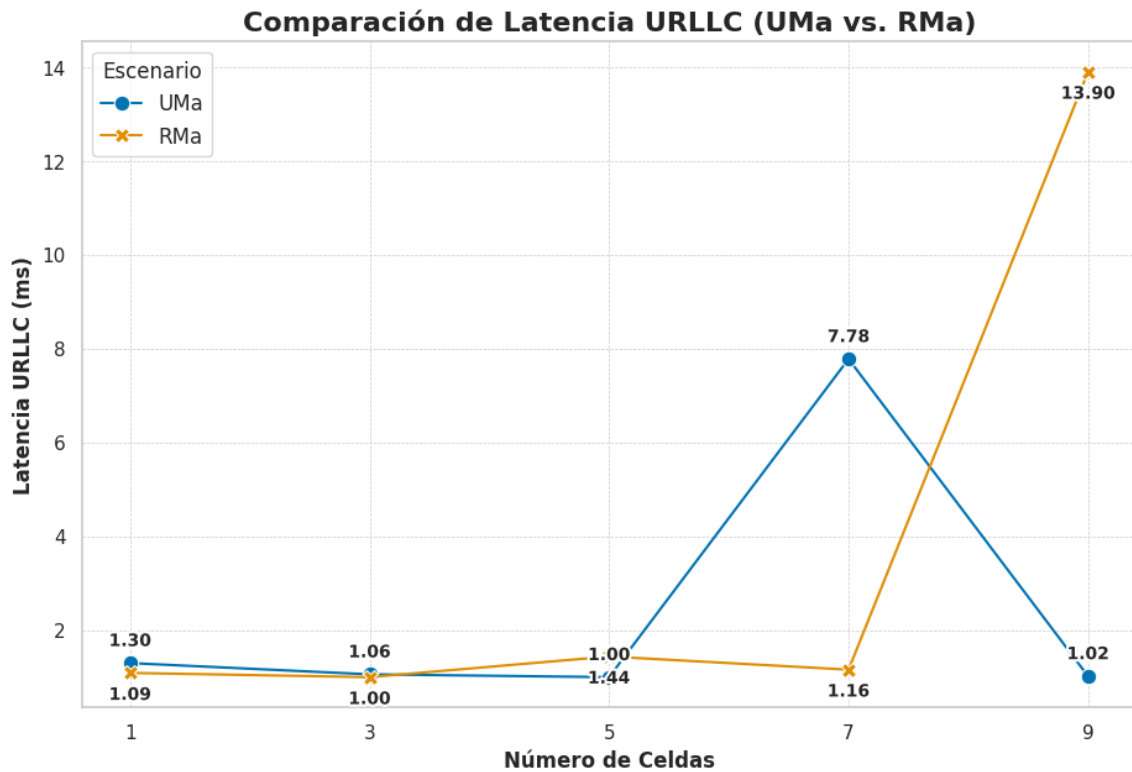


Comparación de la latencia URLLC

Los resultados de UMA muestran valores estables cercanos a 1 ms en casi todas las configuraciones, salvo en siete celdas donde aparece un valor atípico superior a 7 ms. Esto se explica por una condición puntual de congestión o por un comportamiento ineficiente del algoritmo de handover. En RMa la latencia también se mantiene estable entre 1 y 1,5 ms, pero en nueve celdas se dispara hasta alrededor de 14 ms, un valor extremo que se relaciona con usuarios ubicados en zonas de borde con bajo SINR, lo que

genera retransmisiones y aumento en los tiempos de cola. Estos valores atípicos no son fallas del modelo, sino consecuencia de la distribución espacial aleatoria de usuarios.

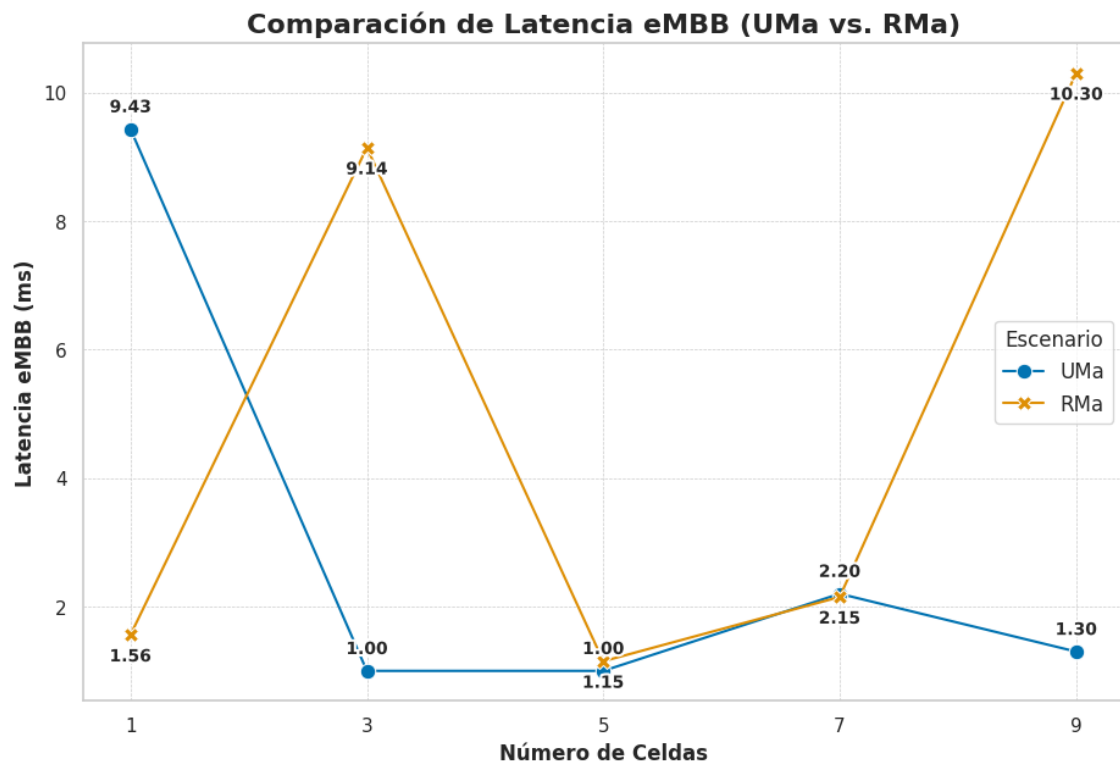
Figura 16 Relación de la latencia URLLC entre escenarios y números de celda



Comparación de la latencia eMBB

En el caso de UMA, se aprecia que el incremento en el número de celdas contribuye en general a mejorar la eficiencia del sistema, ya que la mayor densificación favorece la distribución de recursos y el balanceo de carga. Sin embargo, también se presentan ligeros aumentos de latencia en configuraciones intermedias, producto de la interferencia intercelda. En contraste, en el escenario RMa el comportamiento es más irregular y menos predecible. Aunque con pocas celdas se logran valores bajos, aparecen picos marcados en configuraciones específicas que evidencian inestabilidad. Estos incrementos están vinculados a la pérdida de paquetes y a la variabilidad del canal, factores propios de los entornos rurales, donde la dispersión geográfica de los usuarios y las condiciones de propagación dificultan el rendimiento consistente.

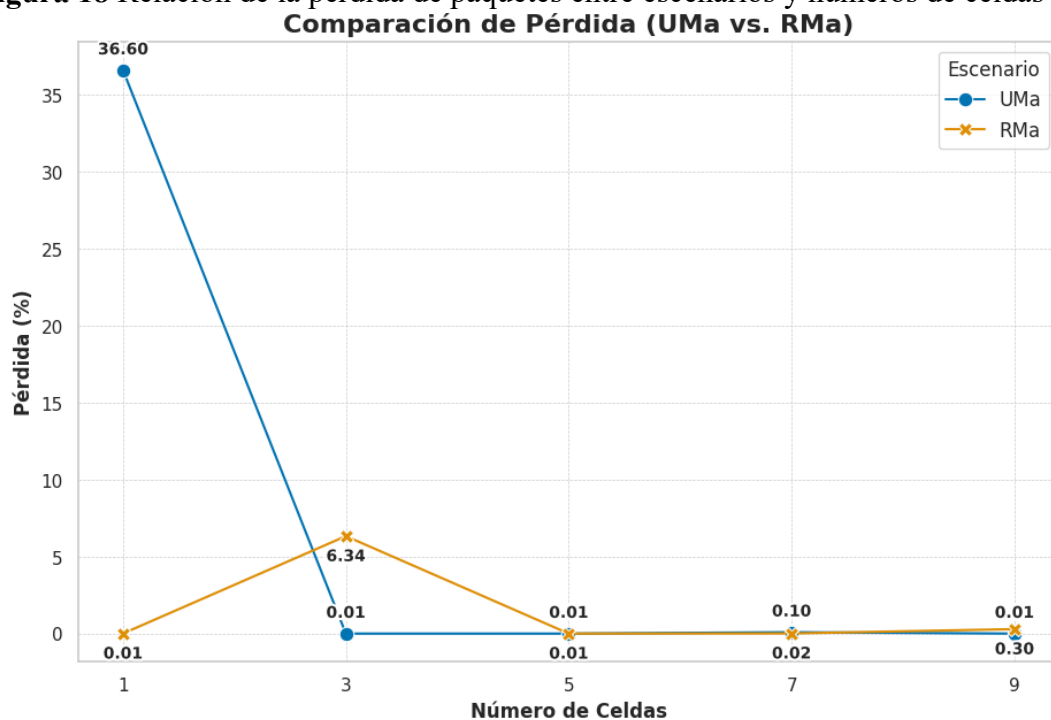
Figura 17 Relación de la latencia eMBB entre escenarios y números de celdas



Comparación de la pérdida de paquetes

En UMa, la pérdida de paquetes resulta crítica con una sola celda debido a la saturación del sistema, pero a medida que se incrementa la infraestructura el valor desciende. En RMa, en tres celdas se observa un incremento notable vinculado a un desbalance en la distribución de usuarios, lo que provoca congestión puntual.

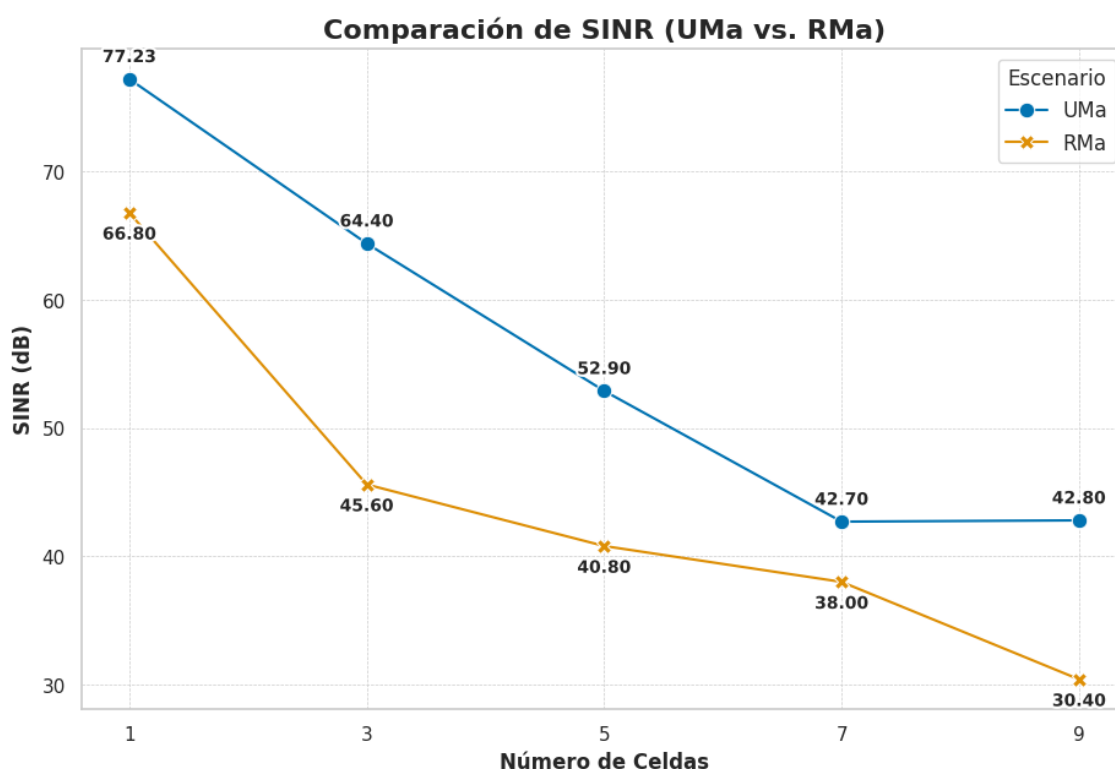
Figura 18 Relación de la pérdida de paquetes entre escenarios y números de celdas



Comparación del SINR promedio

El SINR promedio desciende progresivamente en ambos entornos, lo cual es esperado debido al incremento de la interferencia intercelda. Sin embargo, el SINR del escenario UMA es consistentemente más alto que el de RMa en todos los puntos medidos. Esta diferencia se debe a las características geográficas de cada entorno: en el entorno UMA, la alta densidad de edificios y obstáculos atenúa la señal de celdas lejanas, mitigando la interferencia y resultando en una mejor calidad de señal. En contraste, en el entorno rural RMa, la menor cantidad de obstáculos permite que las señales viajen más lejos con menos atenuación, lo que incrementa la interferencia de celdas distantes y degrada el SINR.

Figura 19 Relación del SINR entre escenarios y números de celdas

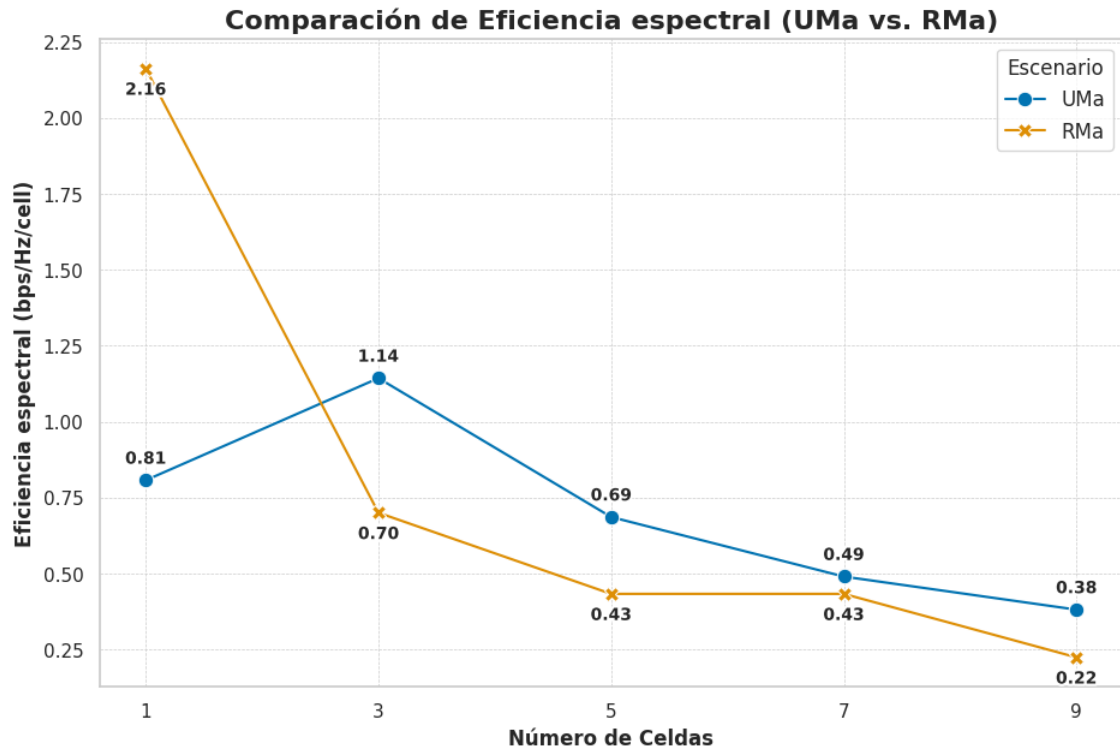


Comparación de la eficiencia espectral

En UMA, la eficiencia espectral alcanza un máximo con tres celdas y luego decrece de forma gradual, mientras que en RMa el valor inicial con una celda es muy alto pero se desploma con la densificación hasta llegar a su mínimo con nueve. Esto refleja que en entornos urbanos densos la agregación de celdas permite aprovechar mejor el espectro en las primeras fases, aunque la interferencia limita los beneficios posteriores, mientras que en zonas rurales la densificación no genera beneficios claros y termina penalizando la

eficiencia por Hz debido al solapamiento de coberturas y a la baja calidad de los enlaces de borde.

Figura 20 Relación de la eficiencia espectral entre escenarios y números de celdas



4.3.1. Discusión

El estudio de Kar y colaboradores del 2025 resalta que, aunque las bandas sub-6 GHz (FR1) ofrecen mayor cobertura y confiabilidad, presentan limitaciones notables. Los autores señalan que, debido a la restricción del espectro disponible en dichas frecuencias, no es posible alcanzar altas tasas de transmisión de datos ni reducir de forma significativa la latencia [53]. Este planteamiento teórico evidencia el dilema central de las comunicaciones inalámbricas: la dificultad de combinar simultáneamente gran alcance y elevado rendimiento .

Los resultados obtenidos corroboran y amplían este enfoque. Las simulaciones en un escenario urbano (UMA) muestran que la densificación de celdas incrementa el throughput y disminuye la latencia, pero al mismo tiempo intensifica la interferencia intercelda, lo que repercute negativamente en la eficiencia espectral. En contraste, en entornos rurales (RMa), dicha estrategia resulta poco efectiva e incluso contraproducente, ya que no se traduce en un aumento real de capacidad y, por el contrario, ocasiona solapamiento de coberturas e inestabilidad en la latencia. De este modo, el análisis

práctico confirma la premisa teórica del artículo, a la vez que evidencia la necesidad de adaptar las estrategias de despliegue al tipo de entorno para contrarrestar las limitaciones de las bandas FR1.

4.3.2. Comparación de escenarios de latencia y pérdidas con una nueva distribución de usuarios en celdas críticas

Para complementar el análisis individual de cada escenario, se realiza una comparación directa entre las configuraciones normales y las obtenidas con la semilla 2, tanto para siete como para nueve celdas. Este contraste permite identificar el grado de variabilidad que introduce la distribución aleatoria de usuarios en las métricas de rendimiento, evaluando su impacto sobre parámetros como throughput, latencia, jitter, y pérdida de paquetes. De esta forma, se obtiene una visión más robusta del comportamiento de la red al considerar diferentes condiciones iniciales, lo que fortalece la validez del análisis.

Tabla 25 Comparación 7 Celdas vs. 7 Celdas Seed 2 UMa

Parámetros	Valor Seed 1	Valor Seed 2	Cambio
Throughput total	342.80	342.83	▲ 0.008%
Latencia URLLC	7.78	1.28	▼ 83.54%
Latencia eMBB	2.20	1.61	▼ 26.81%
Jitter	0.39	0.33	▼ 15.38%
Pérdida	0.10	0.02	▼ 80.00%
SINR	42.70	41.82	▼ 2.06%
Eficiencia espectral	0.49	0.49	— 0.00%

Tabla 26 Comparación 9 Celdas vs. 9 Celdas Seed 2 RMa

Parámetros	Valor Seed 1	Valor Seed 2	Cambio
Throughput total	215.90	216.27	▲ 0.17%
Latencia URLLC	13.90	4.60	▼ 66.90%
Latencia eMBB	10.30	1.14	▼ 88.93%
Jitter	0.64	0.38	▼ 40.62%
Pérdida	0.30	0.09	▼ 70.00%
SINR	30.40	37.30	▲ 22.69%
Eficiencia espectral	0.22	0.24	▲ 9.09%

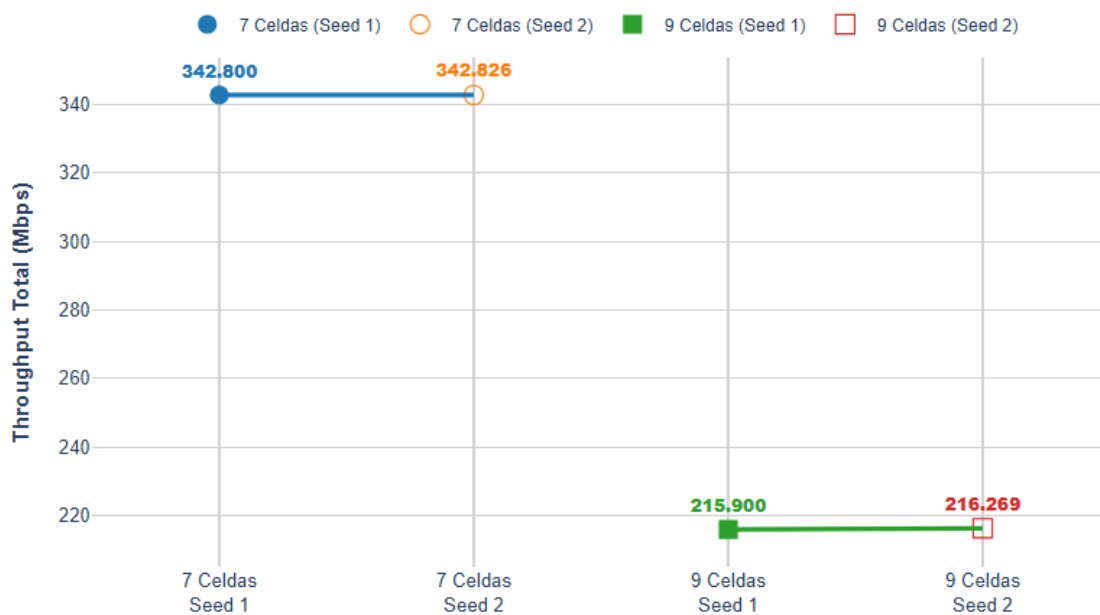
La elección de las configuraciones de siete y nueve celdas para la comparación con la semilla 2 responde a que, dentro de este estudio, representan los casos más exigentes en sus respectivos entornos de propagación.

En el escenario UMA, la configuración de siete celdas mostró un incremento notable de la latencia eMBB y del jitter en comparación con otras densidades, lo que evidencia los efectos de la interferencia intercelda en entornos densos. Por su parte, en el escenario RMa, la configuración de nueve celdas registró valores elevados tanto de latencia como de pérdida de paquetes, revelando inestabilidad en el enlace y variabilidad derivada de la dispersión geográfica de los usuarios. Estas condiciones críticas justifican que se analicen con mayor detalle mediante la comparación entre la simulación normal y la realizada con la semilla 2, con el fin de evaluar cómo influye la distribución aleatoria de usuarios sobre parámetros sensibles y reforzar la validez de los resultados en los escenarios de mayor complejidad.

Comparación de Throughput

Se observa que tanto en el escenario urbano con siete celdas como en el rural con nueve celdas, la variación entre la simulación normal y la realizada con la semilla 2 es prácticamente nula. En UMA con siete celdas, los valores se mantienen alrededor de 343 Mbps, mientras que en RMa con nueve celdas rondan los 216 Mbps, con diferencias mínimas entre ambas ejecuciones. Esto evidencia que el throughput agregado del sistema no se ve significativamente afectado por la redistribución aleatoria de los usuarios, lo que demuestra estabilidad en la capacidad total de transmisión. Sin embargo, esta aparente similitud no descarta que a nivel de latencia, jitter o pérdida de paquetes sí puedan producirse diferencias más notorias, ya que el throughput global refleja el rendimiento agregado, pero no las variaciones puntuales en la calidad de servicio de cada flujo.

Figura 21 Relación del throughput en UMA con 7 celdas y en RMa con 9 celdas



Comparación de latencia URLLC

La métrica de latencia en servicios URLLC resulta crítica para evaluar la capacidad de respuesta de la red en escenarios exigentes. A continuación se muestran los resultados comparativos de la latencia URLLC en escenarios urbanos (7 celdas) y rurales (9 celdas), considerando tanto la simulación base como la ejecutada con una segunda semilla aleatoria.

Figura 22 Relación de la latencia URLLC en UMa con 7 celdas y en RMa con 9 celdas



Se observa que en el escenario urbano con siete celdas (UMa) y en el rural con nueve celdas (RMa), la variación de la latencia entre la simulación base y la realizada con la semilla 2 resulta mucho más marcada que en el caso del throughput. En siete celdas, la latencia para el tráfico URLLC desciende de 7.780 ms a 1.284 ms, evidenciando una mejora significativa en la segunda ejecución. Por su parte, en nueve celdas, la latencia se reduce de 13.900 ms a 4.596 ms, manteniéndose en valores más elevados que en el entorno urbano, pero mostrando igualmente una disminución importante. Esto refleja que la redistribución aleatoria de los usuarios puede impactar directamente en métricas sensibles como la latencia, en contraste con el throughput agregado, que se mantiene más estable.

Comparación de latencia eMBB

En el caso del tráfico eMBB, la latencia constituye un indicador importante para valorar la eficiencia del sistema en la transmisión de datos masivos. A diferencia de URLLC, donde el retardo mínimo es prioritario, en eMBB el objetivo se centra en garantizar estabilidad y tiempos de respuesta aceptables para aplicaciones de gran ancho de banda. Con este propósito, la figura siguiente presenta la comparación de la latencia eMBB en escenarios urbanos (7 celdas) y rurales (9 celdas), bajo ejecuciones con la semilla base y con la semilla 2.

Figura 23 Relación de la latencia eMBB en UMa con 7 celdas y en RMa con 9 celdas

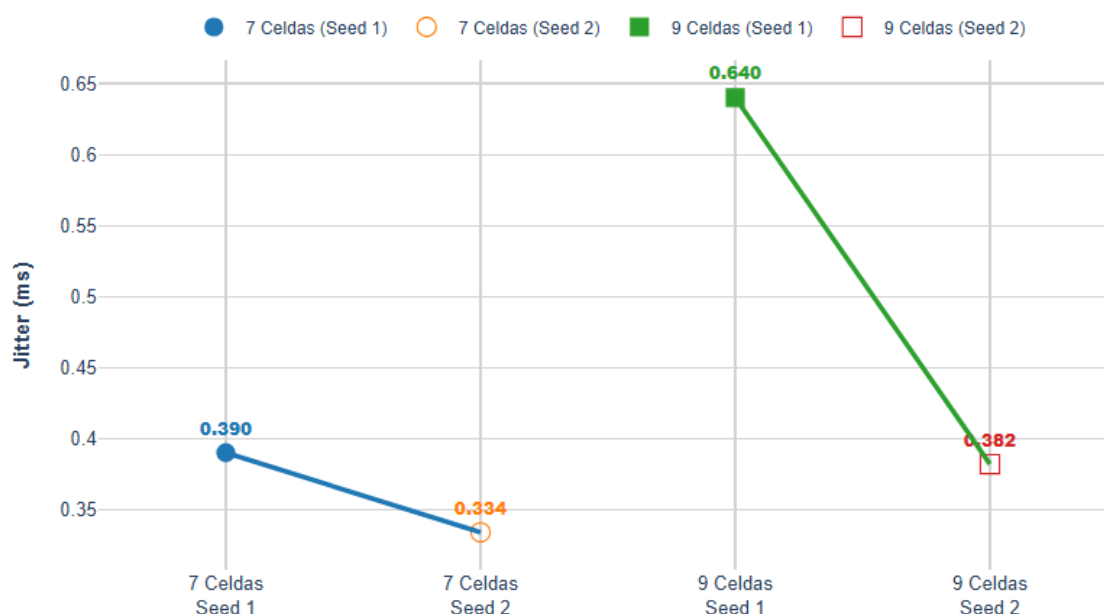


Se observa que en el escenario urbano con siete celdas la latencia eMBB disminuye levemente al pasar de 2.200 ms en la simulación base a 1.615 ms en la ejecución con la semilla 2, evidenciando una variación poco significativa. En contraste, en el entorno rural con nueve celdas la diferencia es mucho más notoria: la latencia desciende de 10.300 ms a 1.135 ms, lo que representa una mejora sustancial en la segunda ejecución. Este comportamiento muestra que, aunque en entornos urbanos la redistribución de usuarios tiene un impacto limitado sobre la latencia eMBB, en entornos rurales la disposición espacial puede influir considerablemente en la calidad del servicio, reduciendo de manera drástica los tiempos de respuesta cuando la distribución resulta más favorable.

Comparación del jitter

El jitter es una métrica clave para evaluar la variabilidad en el retardo de los paquetes, siendo especialmente relevante en aplicaciones en tiempo real como videollamadas o transmisión de voz, donde la estabilidad es tan importante como la latencia promedio. EN la siguiente figura, se presentan los resultados del jitter en escenarios urbanos con siete celdas y rurales con nueve celdas

Figura 24 Relación del jitter en UMa con 7 celdas y en RMa con 9 celdas



Se aprecia que en el escenario urbano con siete celdas el jitter presenta valores estables, reduciéndose ligeramente de 0.390 ms en la primera simulación a 0.334 ms con la semilla 2, lo que refleja una variación mínima. En el caso rural con nueve celdas, los resultados muestran un cambio más notorio: el jitter desciende de 0.640 ms a 0.382 ms, indicando una mejora significativa en la segunda ejecución. Este comportamiento recalca que, aunque en entornos urbanos la redistribución de usuarios apenas impacta en la variabilidad de los retardos, en escenarios rurales la disposición espacial de los dispositivos puede contribuir a estabilizar de manera más marcada la transmisión de paquetes, mejorando la calidad de experiencia de los servicios sensibles a fluctuaciones en el retardo.

Comparación de la pérdida de paquetes

Un valor elevado puede impactar directamente en la continuidad de la comunicación y en la experiencia del usuario. En este sentido, se analizan a continuación los resultados obtenidos en escenarios urbanos con siete celdas y rurales con nueve celdas, considerando la ejecución base y la repetición con la semilla 2, con el fin de identificar el efecto de la redistribución aleatoria de usuarios en esta métrica.

Figura 25 Relación de la pérdida de paquetes en UMa con 7 celdas y en RMa con 9 celdas



En el escenario urbano con siete celdas, la pérdida de paquetes se reduce de 0.100 % a 0.019 % al pasar de la simulación inicial a la realizada con la semilla 2, reflejando una mejora considerable en la confiabilidad de la transmisión. En el entorno rural con nueve celdas, la disminución también es notoria: de 0.300 % a 0.091 %, lo que nos vuelve a afirmar que la redistribución de usuarios favorece una reducción significativa en la proporción de paquetes perdidos. Estos resultados confirman que métricas sensibles como la pérdida de paquetes sí pueden mostrar variaciones sustanciales, reforzando la importancia de evaluar múltiples indicadores para obtener una visión integral de la calidad de servicio en la red.

4.3.3. Comparación de escenarios con baja carga de usuarios

En la etapa final del análisis se consideró el comportamiento de la red bajo condiciones de baja carga de usuarios, con el fin de identificar si la reducción en la demanda de tráfico impacta de manera significativa en las métricas de desempeño. Este enfoque resulta relevante porque en situaciones reales no siempre la red opera al máximo de su capacidad, sino que existen intervalos en los que la cantidad de usuarios conectados es limitada.

Figura 26 Escenario de 1 celda con baja carga de usuario

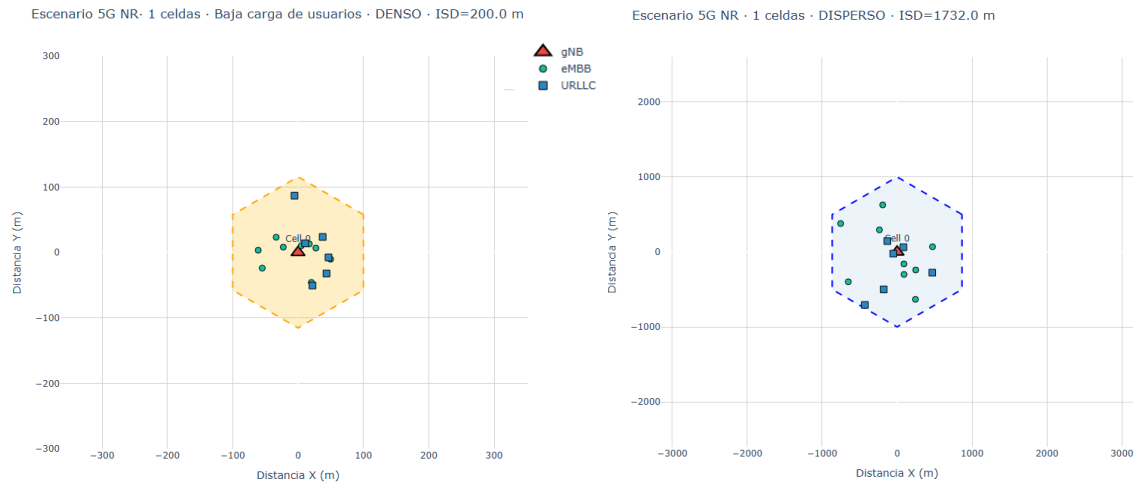


Figura 27 Escenario de 3 celdas con baja carga de usuario

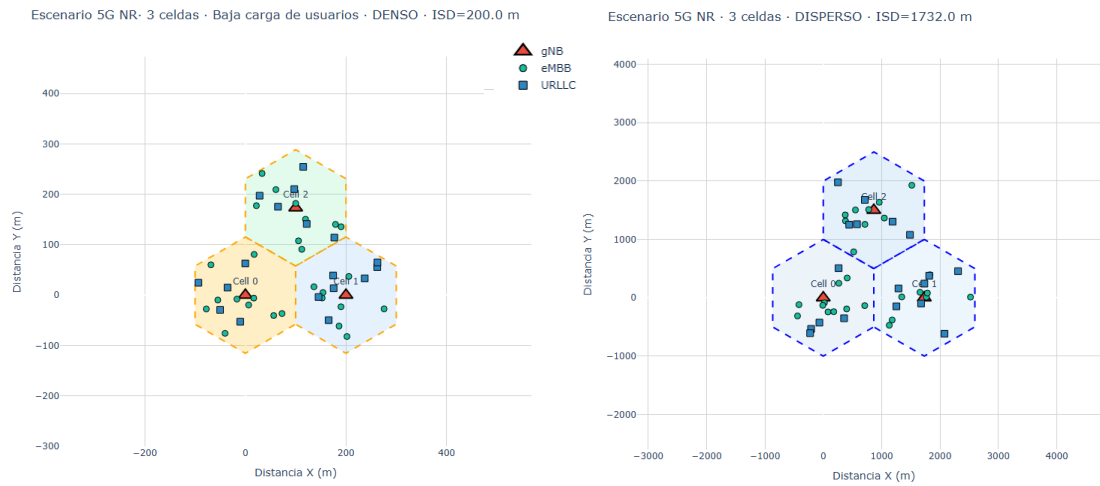


Figura 28 Escenario de 5 celdas con baja carga de usuario

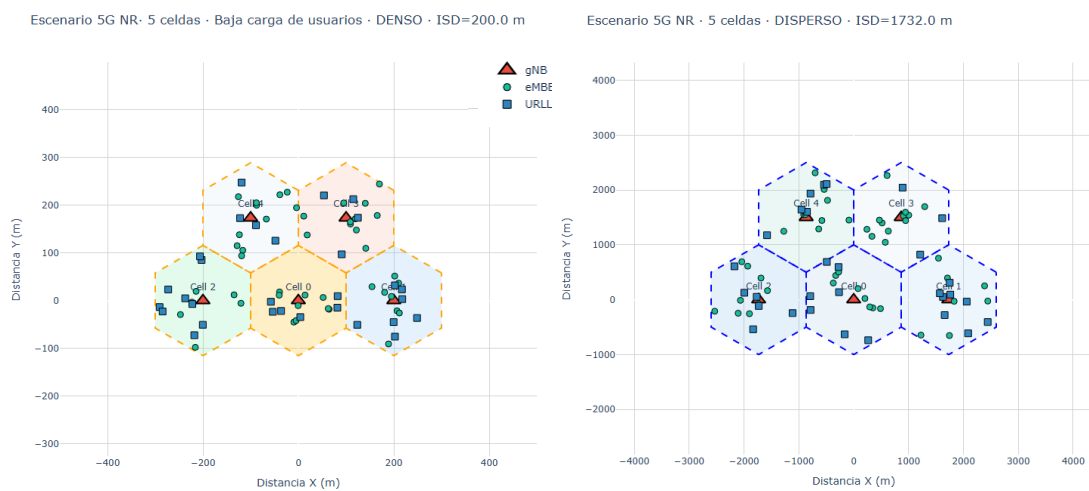


Figura 29 Escenario de 7 celdas con baja carga de usuario

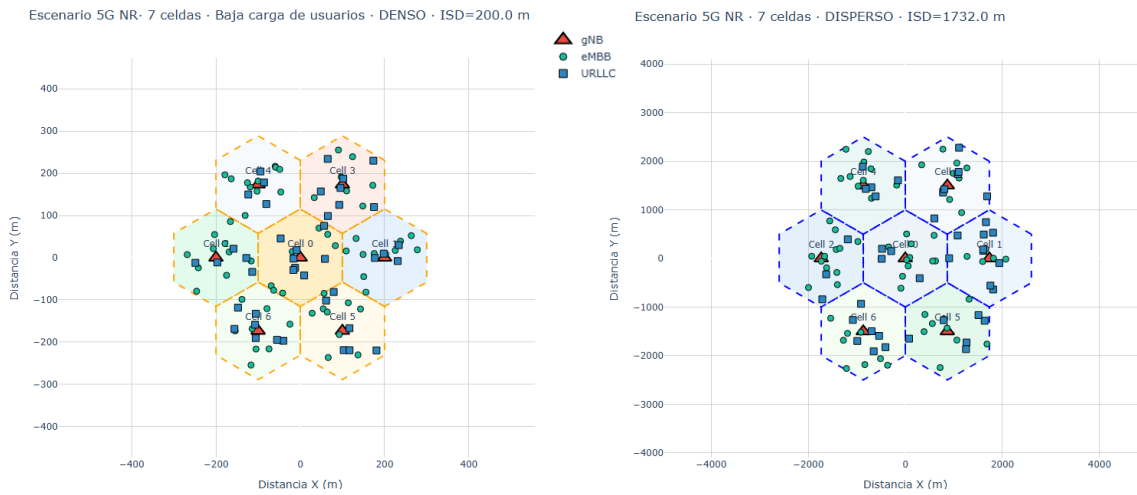
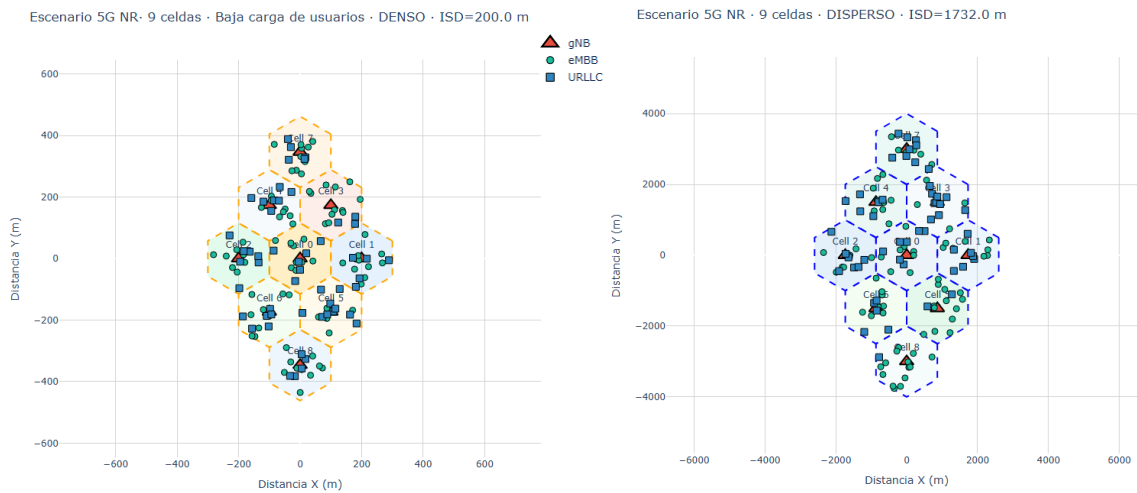


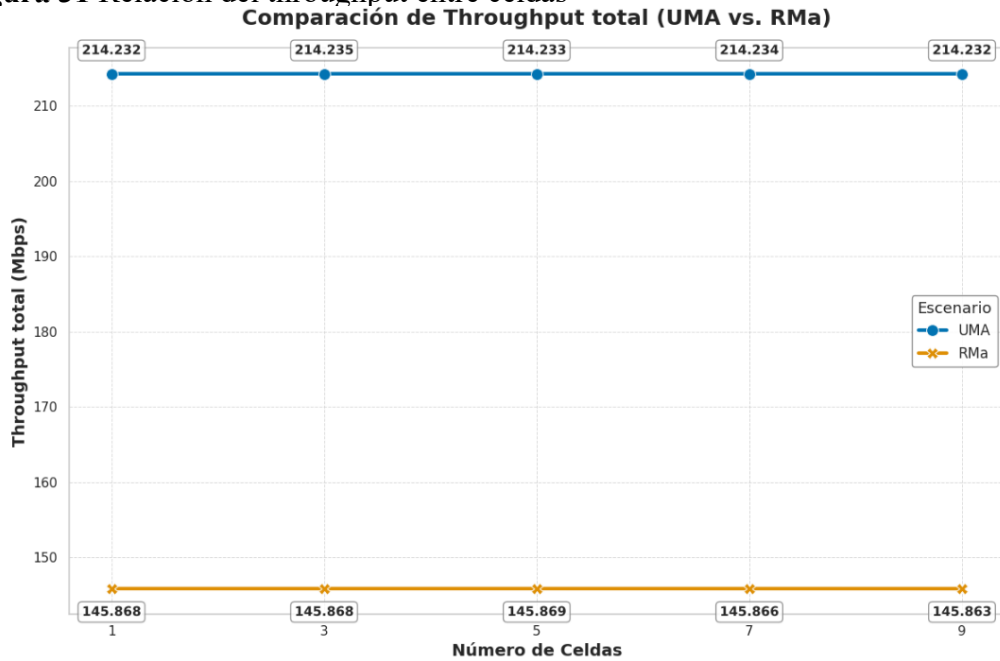
Figura 30 Escenario de 9 celdas con baja carga de usuario



Comparación del throughput

En los escenarios evaluados, el throughput total se mantuvo prácticamente constante en todas las configuraciones tal y como se observa en la figura 21. En UMa los valores se ubicaron alrededor de 214 Mbps, mientras que en RMa se estabilizaron en torno a 145 Mbps. Esto evidencia que en el entorno rural, la propagación y dispersión de los usuarios condiciona el aprovechamiento de la capacidad disponible.

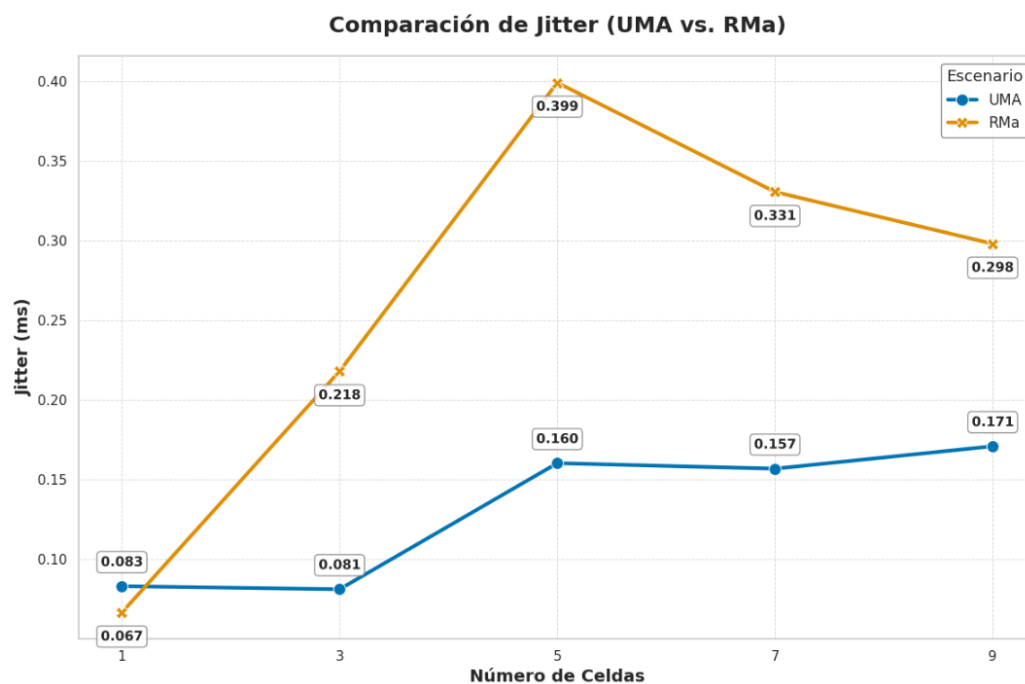
Figura 31 Relación del throughput entre celdas



Comparación del jitter

En el escenario UMA, el jitter se mantuvo bajo en todas las configuraciones, con ligeros incrementos a partir de cinco celdas, estabilizándose entre 0,16 y 0,17 ms. En el escenario rural RMa, en cambio, se observaron valores más variables, alcanzando un pico de 0,40 ms en cinco celdas y disminuyendo progresivamente en configuraciones posteriores. Esto muestra que el jitter en áreas rurales es más sensible a la distribución de usuarios y a las condiciones de propagación, mientras que en entornos urbanos conserva mayor estabilidad.

Figura 32 Relación del jitter entre celdas

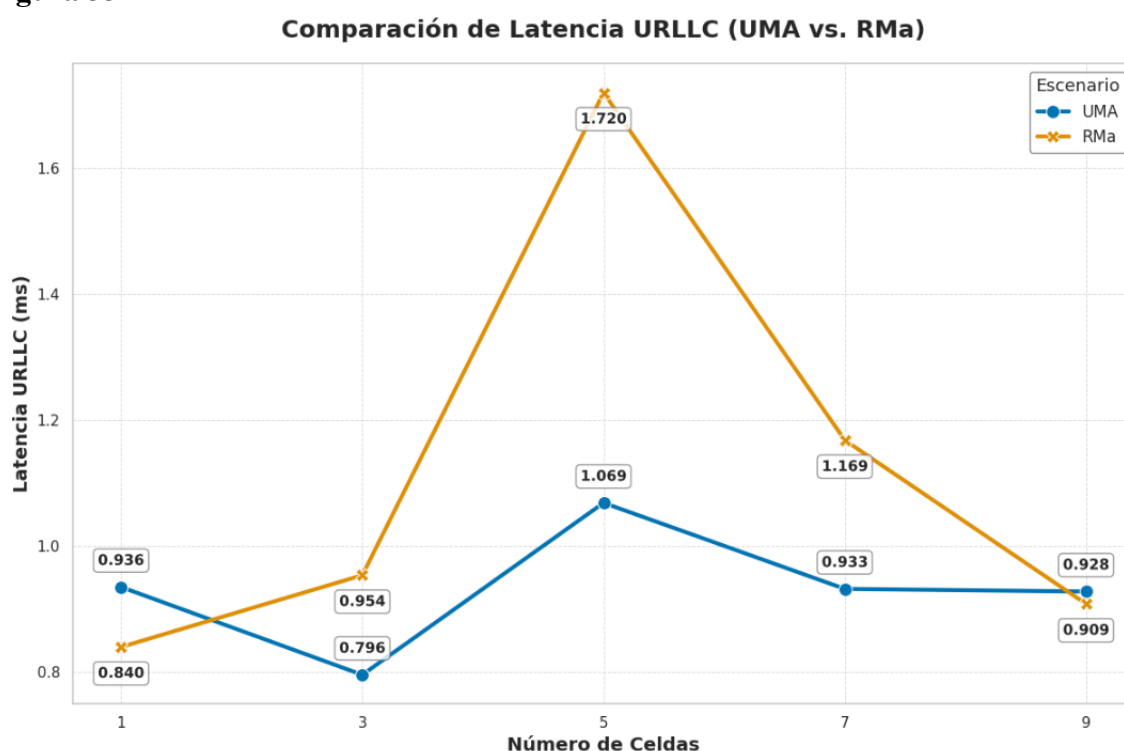


Comparación de la latencia URLLC

En el escenario UMA, la latencia URLLC se mantuvo cercana a 1 ms en todas las configuraciones, con ligeras variaciones y un máximo en cinco celdas (1,07 ms). En el escenario RMa, los valores fueron similares, aunque se presentó un pico significativo en cinco celdas lo que indica un desbalance en la distribución de usuarios y una mayor susceptibilidad a las condiciones de propagación propias de este entorno. Posteriormente, en siete y nueve celdas, la latencia descendió nuevamente hasta valores más cercanos al milisegundo, mostrando una tendencia de recuperación del sistema.

En general, aunque ambos escenarios cumplen con los requerimientos de baja latencia de URLLC, UMA ofrece un comportamiento más predecible y estable, mientras que RMa refleja una mayor sensibilidad a configuraciones específicas, lo que resalta la importancia de una adecuada planificación de la red en áreas rurales para evitar degradaciones puntuales en el desempeño.

Figura 33 Relación de la latencia URLLC entre celdas

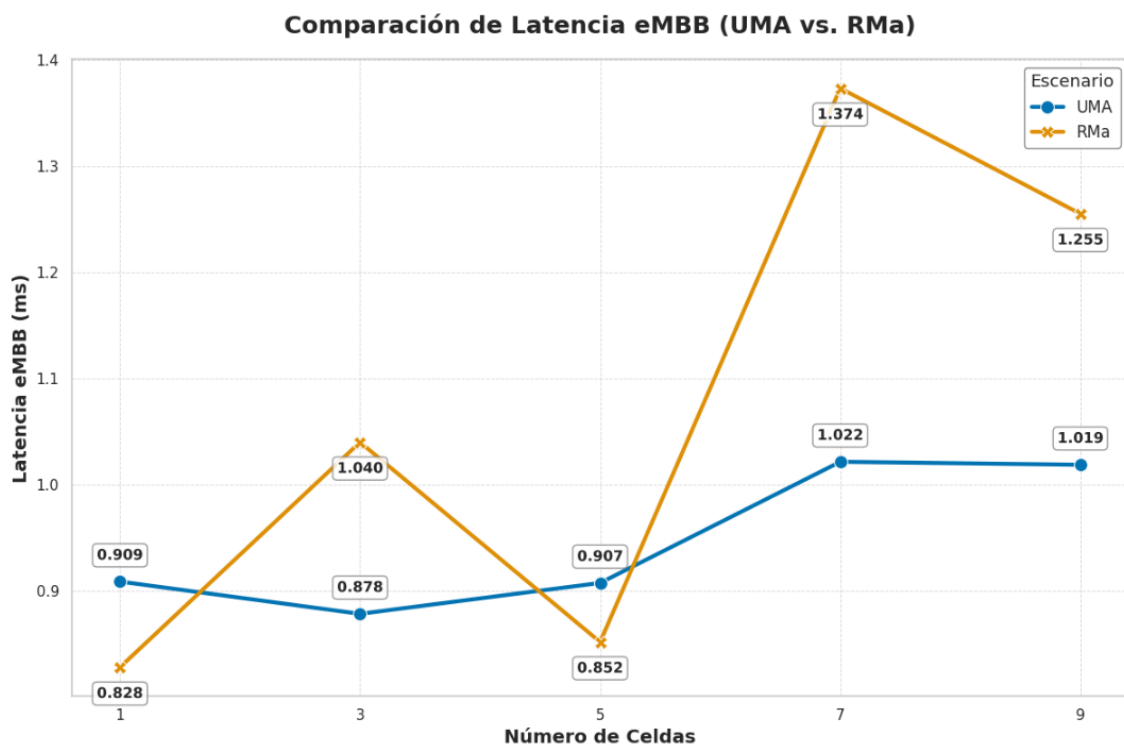


Comparación de la latencia eMBB

En el escenario UMA, la latencia eMBB se mantuvo muy estable en todas las configuraciones, con valores que oscilaron entre 0,88 y 1,02 ms. El mínimo se registró en tres celdas, mientras que los valores más altos aparecieron en siete y nueve celdas,

alcanzando ligeramente por encima de 1 ms. Esto refleja que, en entornos urbanos densos, la latencia para servicios eMBB se encuentra bien controlada y dentro de los rangos óptimos. En contraste, el escenario RMa mostró una mayor variabilidad en la latencia eMBB. Con una celda inicial se obtuvo el valor más bajo (0,83 ms), mientras que en configuraciones intermedias se alternaron descensos y aumentos. El caso más crítico se presentó en siete celdas (1,37 ms), seguido de nueve celdas con 1,26 ms, lo que evidencia que en áreas rurales la dispersión geográfica de usuarios y las condiciones de propagación impactan de manera más directa en la latencia, generando valores menos estables que en el entorno urbano.

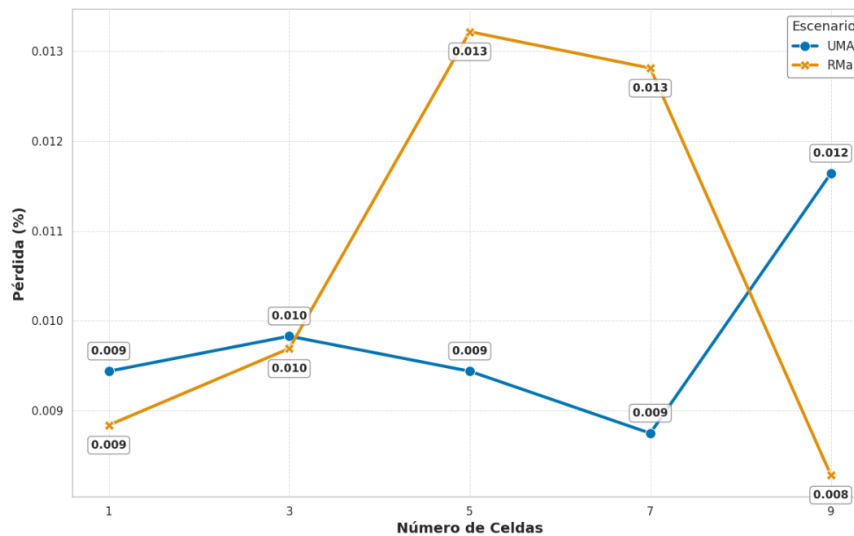
Figura 34 Relación de la latencia EMBB entre celdas



Comparación de la pérdida de paquetes

En el escenario urbano UMA y RMA, la pérdida de paquetes se mantuvo en niveles muy bajos y prácticamente constantes en todas las configuraciones, con valores que oscilaron entre 0,009 % y 0,012 %. Estos resultados indican que, a pesar de la densificación de celdas, el sistema logra preservar una alta fiabilidad en la entrega de datos.

Figura 35 Relación de la pérdida de paquetes entre celdas
Comparación de Pérdida (UMA vs. RMa)



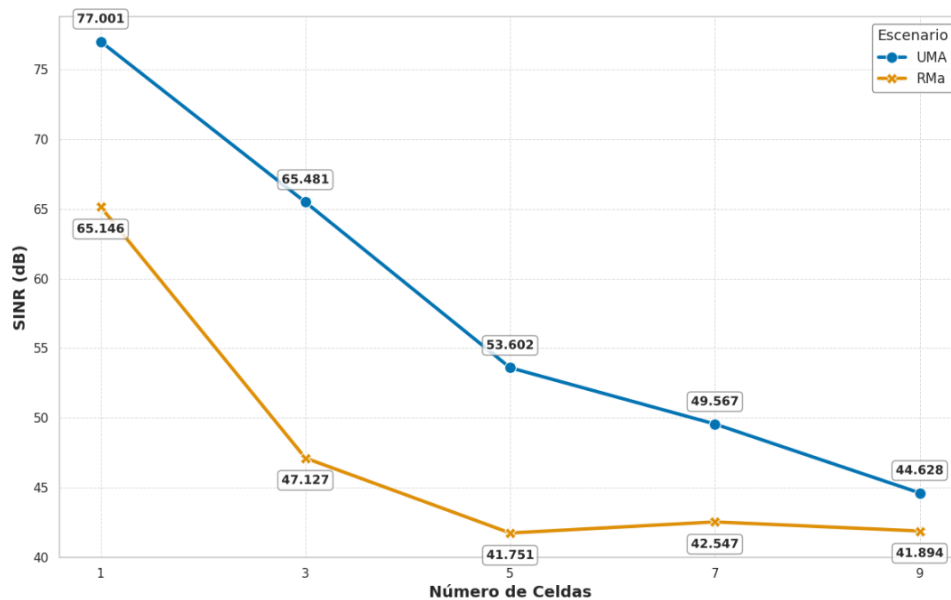
Comparación del SINR promedio

En el escenario urbano (UMA), los valores de SINR presentaron una clara tendencia decreciente conforme se incrementó el número de celdas. Con una celda se alcanzó el valor más alto (77 dB), mientras que en nueve celdas descendió hasta 44,63 dB.

En el escenario rural (RMa), la misma tendencia fue observada, aunque con valores generales más bajos. Con una celda se obtuvo un máximo de 65,15 dB, mientras que a partir de tres celdas el SINR cayó abruptamente y se estabilizó en torno a los 41–42 dB.

En conjunto, los resultados muestran que la densificación celular impacta negativamente en el SINR, siendo este efecto más pronunciado en el escenario rural, donde la propagación añade un factor adicional de degradación de señal.

Figura 36 Relación del SINR entre celdas
Comparación de SINR (UMA vs. RMa)



4.4. Resumen de resultados

Tabla 27 Resumen de resultados

Logro o Métrica Prioritaria	Escenario Más Favorable	Configuración Clave	Justificación Principal
Mayor Capacidad Agregada (Throughput Total)	Urban Macro (UMA)	Alta Densificación (7 o 9 Celdas)	La densificación en entornos urbanos mejoró significativamente el Throughput total aprovechando la proximidad de los usuarios a las estaciones base.
Mínima Latencia (eMBB y URLLC)	Urban Macro (UMA)	Baja Carga de Usuarios (1 Celda)	En condiciones de baja demanda, la latencia URLLC/eMBB fue mínima, confirmando la capacidad potencial de la red 5G sin congestión
Reducción Crítica de Pérdidas/Latencia	Ambos Escenarios (UMA y RMa)	Optimización de Distribución de Usuarios	La optimización en la distribución espacial de los usuarios demostró ser crucial, reduciendo la pérdida de paquetes y la latencia en los escenarios más críticos

Logro o Métrica Prioritaria	Escenario Más Favorable	Configuración Clave	Justificación Principal
Máxima Estabilidad y Robustez	Urban Macro (UMA)	Densificación Media (3 o 5 Celdas)	El escenario UMA demostró mayor estabilidad y robustez general en las métricas incluso bajo alta carga, manteniendo pérdidas de paquetes casi nulas.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El estudio permitió identificar que variables como el SINR, la interferencia, el beamforming, la numerología y el MIMO tienen un impacto decisivo en el rendimiento de las redes 5G. La caracterización teórica y experimental del canal confirmó que el uso de modelos realistas como el 3GPP TR 38.901 resulta fundamental para predecir con precisión la cobertura y la capacidad en distintos escenarios, proporcionando una base sólida para el diseño y la planificación de redes futuras.

Las simulaciones realizadas en UMA y RMa con configuraciones de 1, 3, 5, 7 y 9 celdas demostraron que la densificación mejora el throughput y reduce la latencia en entornos urbanos, aunque incrementa la interferencia intercelda y limita la eficiencia espectral. En contraste, en entornos rurales, la densificación no genera beneficios proporcionales de capacidad, mostrando un comportamiento más sensible a la dispersión espacial de los usuarios y a la propagación.

La comparación de métricas clave como throughput, latencia, jitter, pérdida de paquetes, SINR y eficiencia espectral evidenció que el escenario urbano mantiene mayor estabilidad y robustez, mientras que el rural presenta mayor variabilidad y valores atípicos. Estos resultados validan que la optimización del rendimiento en redes 5G depende tanto de la configuración de celdas como del entorno geográfico en que se despliegan, siendo necesario adaptar estrategias diferenciadas para áreas urbanas y rurales.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda profundizar en el uso de modelos de canal más avanzados, incorporando escenarios adicionales como interiores o entornos mixtos urbano–rural, con el fin de obtener resultados más cercanos a situaciones reales. Asimismo, se sugiere la integración de nuevas métricas como el BER (Bit Error Rate) y la capacidad de enlace ascendente, lo cual complementaría la caracterización del desempeño global de la red.

Se aconseja extender las simulaciones hacia la banda FR2 (mmWave), donde las condiciones de propagación y cobertura presentan mayores retos frente a FR1. Además, se recomienda evaluar el efecto de distintas configuraciones de numerología y de algoritmos de planificación de recursos (schedulers), de manera que se pueda optimizar

el rendimiento de la red en términos de throughput, latencia y eficiencia espectral según el tipo de servicio considerado.

Se sugiere que futuros trabajos incluyan el análisis de técnicas avanzadas como network slicing o multi-conectividad, que permitirían adaptar la red a distintos requerimientos de usuarios y servicios en escenarios urbanos y rurales. Estas tecnologías, combinadas con la evaluación de métricas de calidad de servicio y experiencia, proporcionarían una visión más integral del desempeño de las redes 5G y su aplicabilidad en contextos heterogéneos.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6.1. BIBLIOGRAFIAS

- [1] Dr. A. S. George, A. S. H. George, and Dr. T. Baskar, “SD-WAN Security Threats, Bandwidth Issues, SLA, and Flaws: An In-Depth Analysis of FTTH, 4G, 5G, and Broadband Technologies,” *Partners Universal International Innovation Journal*, vol. 1, no. 3, pp. 1–37, Jun. 2023, doi: 10.5281/ZENODO.8057014.
- [2] “5G in Latin America - GSMA Latin America.” Accessed: Feb. 26, 2025. [Online]. Available: https://www.gsma.com/about-us/regions/latin-america/gsma_resources/5g-in-latin-america/
- [3] “El impacto de los precios del espectro en América Latina - GSMA Latin America.” Accessed: Feb. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.gsma.com/about-us/regions/latin-america/the-impact-of-spectrum-prices-in-latin-america/>
- [4] “Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información,” 2022.
- [5] “La cobertura de banda ancha móvil es del 70% en las ciudades; pero de apenas el 20% en las zonas rurales – Diario La Hora.” Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.lahora.com.ec/pais/zonas-rurales-cobertura-banda-ancha-movil-ciudades/>
- [6] I. Afolabi, T. Taleb, K. Samdanis, A. Ksentini, and H. Flinck, “Network slicing and softwarization: A survey on principles, enabling technologies, and solutions,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2429–2453, Jul. 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2815638.
- [7] Agencia de regulación y control de las Telecomunicaciones, “Informe de rendición de cuentas.” Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: www.arcotel.gob.ec
- [8] E. Hajlaoui, A. Zaier, A. Khelifi, J. Ghodhbane, M. Ben Hamed, and L. Sbita, “4G and 5G technologies: A Comparative Study,” in *2020 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing, ATSIP 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2020. doi: 10.1109/ATSIP49331.2020.9231605.
- [9] Dr. A. S. George, A. S. H. George, and Dr. T. Baskar, “SD-WAN Security Threats, Bandwidth Issues, SLA, and Flaws: An In-Depth Analysis of FTTH, 4G, 5G, and

- Broadband Technologies,” *Partners Universal International Innovation Journal*, vol. 1, no. 3, pp. 1–37, Jun. 2023, doi: 10.5281/ZENODO.8057014.
- [10] M. Attaran, “The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization,” *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 14, no. 5, pp. 5977–5993, May 2023, doi: 10.1007/S12652-020-02521-X/TABLES/1.
 - [11] Telefónica, “Qué es el 5G y cómo funciona.” Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.telefonica.com/es/wp-content/uploads/sites/4/2021/11/como-funciona-el-5G.jpg.pdf>
 - [12] Brisson Pedro, “El 5G: Impulsando la Revolución de la Conectividad » UNLP,” Universidad Nacional de la Plata. Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://unlp.edu.ar/investiga/bajolalupa/el-5g-impulsando-la-revolucion-de-la-conectividad-73202/>
 - [13] Repsol, “Tecnología 5G: Revolución en conectividad y futuro digital.” Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/tecnologia-innovacion/tecnologia-5g/index.cshtml>
 - [14] Marit Acuña, “La Red 5G: presente y futuro de la Educación - EVirtualplus.” Accessed: Aug. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.evirtualplus.com/red-5g-futuro-educacion/>
 - [15] Cisco, “¿Qué es el 5G? - ¿Cómo funciona la tecnología de red 5G?” Accessed: Dec. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/what-is-5g.html>
 - [16] Digi International, “Qué es 5G NR (Nueva Radio) | Definición | Digi International.” Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://es.digi.com/resources/definitions/5g-nr>
 - [17] Rohde and Schwarz, “5G NR MIMO signal analysis,” Mar. 2020, Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: www.rohde-schwarz.com/support
 - [18] “5G, 5G-NR, MIMO, URLLC, and Network Slicing | Corning.” Accessed: Aug. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.corning.com/optical-communications/emea/en/home/applications/5g-is-here-and-it-is-made-of-glass/demystifying-5g.html>

- [19] Huawei, “¿Qué es URLLC?” Accessed: Dec. 29, 2024. [Online]. Available: <https://forum.huawei.com/enterprise/es/%C2%BFqu%C3%A9-es-urllc/thread/667241512725004289-667212889045479424>
- [20] “¿Qué es uRLLC en 5G? | Definición | Digi International.” Accessed: Aug. 08, 2025. [Online]. Available: <https://es.digi.com/resources/definitions/urllc>
- [21] B. S. Khan, S. Jangsher, A. Ahmed, and A. Al-Dweik, “URLLC and eMBB in 5G Industrial IoT: A Survey,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 3, pp. 1134–1163, 2022, doi: 10.1109/OJCOMS.2022.3189013.
- [22] “¿Qué es la banda ancha móvil mejorada (Embb)? – Wray Castle.” Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://wraycastle.com/es/blogs/glossary/what-is-enhanced-mobile-broadband-embb>
- [23] Intel, “Learn about Multiple-Input Multiple-Output,” Jul. 2025, Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000005714/wireless/legacy-intel-wireless-products.html>
- [24] Cidoncha Manuel and Escribano Francisco, “Estudio y evaluación de técnicas massive MIMO para 5G,” Universidad de Alcalá Escuela Politécnica Superior, Alcalá de Henares, 2019. Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/38752/TFG_Cidoncha_Quirós_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [25] M. Kaur, L. Kansal, and N. Kaur, “Image transmission using MIMO-OSTBC3 space-time encoding,” *Far East Journal of Electronics and Communications*, vol. 17, no. 6, pp. 1437–1450, Dec. 2017, doi: 10.17654/EC017061437.
- [26] “¿Qué es Beamforming?” Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.lowi.es/glosario/beamforming/>
- [27] ARCOTEL, “INFRAESTRUCTURA Y COBERTURA,” *BOLETÍN ESTADÍSTICO TRIMESTRAL*, vol. 2020–02, pp. 1–17, May 2020, Accessed: Dec. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/BoletinEstadistico-May2020-SMA-CoberturaInfraestructura.pdf>

- [28] APWColombia, “Cobertura vs. Capacidad de red | APW Colombia.” Accessed: Dec. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.apwcolombia.co/cobertura-vs-capacidad-de-red/>
- [29] “Ancho de banda - Glosario de MDN Web Docs: Definiciones de términos relacionados con la Web | MDN.” Accessed: Dec. 29, 2024. [Online]. Available: <https://developer.mozilla.org/es/docs/Glossary/Bandwidth>
- [30] “¿Qué es la latencia? - Explicación de la latencia de red - AWS.” Accessed: Dec. 29, 2024. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/es/what-is/latency/>
- [31] E. Y. Telecomunicaciones Carlos Julio Corrales Moya, “DISEÑO DE REDES UTILIZANDO LA TECNOLOGIA DE LAS FEMTOCELDAS EN LA TELEFONIA MOVIL”.
- [32] “Células 5G - ¿Qué son las macrocélulas, las células pequeñas y los DAS? | TeckNexus.” Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://tecknexus.com/5g-network/5g-magazine-5g-tower-small-cells-das-edition/5g-cells-what-are-macro-cells-small-cells-and-das/>
- [33] “Explicación de las celdas pequeñas 5G: lo que necesita saber.” Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://telecom.dingli.com/a-guide-to-understanding-5g-small-cell-technology/>
- [34] “Small Cell - Arctic Semiconductor.” Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://arcticsemiconductor.com/small-cell/#outdoor>
- [35] FUTURECOM DIGITAL, “Densificación de redes y su papel para el buen funcionamiento del 5G.” Accessed: Dec. 29, 2024. [Online]. Available: <https://digital.futurecom.com.br/artigos/densificacin-de-redes-y-su-papel-para-el-buen-funcionamiento-del-5g/>
- [36] W. M. H. Azamuddin, R. Hassan, A. H. Mohd Aman, M. K. Hasan, and A. S. Al-Khaleefa, “Quality of Service (QoS) Management for Local Area Network (LAN) Using Traffic Policy Technique to Secure Congestion,” *Computers 2020, Vol. 9, Page 39*, vol. 9, no. 2, p. 39, May 2020, doi: 10.3390/COMPUTERS9020039.

- [37] “Medida de la Calidad de Experiencia de usuario – Grupo de Comunicaciones Multimedia.” Accessed: Feb. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.comm.upv.es/es/medida-de-la-calidad-de-experiencia-de-usuario/>
- [38] NS-3, “ns-3 Tutorial Release ns-3.43 ns-3 project,” Oct. 2024, Accessed: Dec. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/documentation/>
- [39] “5G NR SINR Measurement and Its Mapping - Techplayon.” Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.techplayon.com/5g-nr-sinr-measurement-and-its-mapping/>
- [40] “What is SINR (Signal to Interference & Noise Ratio)? ISCO International.” Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://isointl.com/sinr-optimization/>
- [41] “Mediciones Inalámbricas: Un Pilar Fundamental para Redes Eficientes - abcXperts.” Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://abcxperts.com/mediciones-inalambricas-un-pilar-fundamental-para-redes-eficientes/>
- [42] “Jitter Definition - FraudNet.” Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.fraud.net/glossary/jitter#what-is-jitter>
- [43] “Cómo evitar la pérdida de paquetes al transmitir en vivo.” Accessed: Aug. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.switcherstudio.com/blog/packet-loss>
- [44] “What Is Packet Loss? How to Fix It - IT Glossary | SolarWinds”.
- [45] Q. Zhu, C. Wang, B. Hua, K. Mao, S. Jiang, and M. Yao, “3GPP TR 38.901 Channel Model,” *Wiley 5G Ref*, pp. 1–35, Jan. 2021, doi: 10.1002/9781119471509.W5GREF048.
- [46] “5G/NR - Numerology / SCS (Sub Carrier Spacing) ,” TechnoteShare. Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Phy_Numerology.html
- [47] “5G NR numerology | Smart Telecom Edu.” Accessed: Aug. 10, 2025. [Online]. Available: <https://5g.smarttelecomedu.com/5g-nr-numerology/>

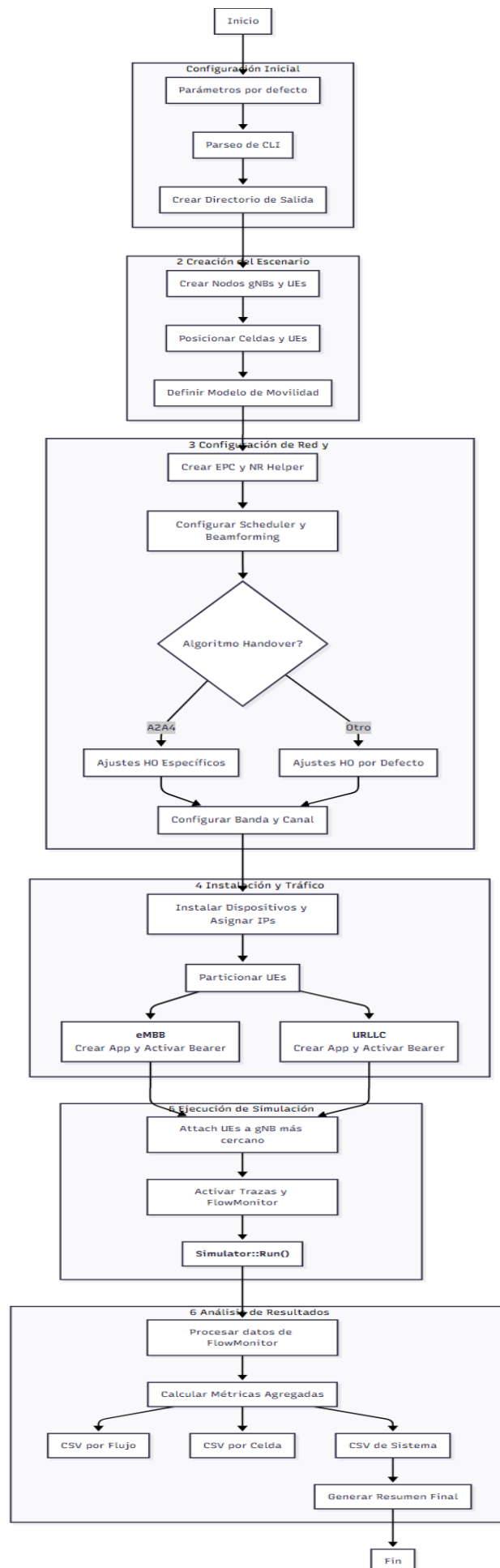
- [48] A. Jain, P. Vats, P. Singh, S. Tiwari, and M. Alim, “Enhancing Beyond-5G and 6G Network Backhaul through Hybrid RF-FSO Communication: An Examination of HAPS and LEO Satellite Integration,” *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends*, vol. 10, no. 6, pp. 2246–2249, Nov. 2024.
- [49] R. Borralho, A. Mohamed, A. U. Quddus, P. Vieira, and R. Tafazolli, “A Survey on Coverage Enhancement in Cellular Networks: Challenges and Solutions for Future Deployments,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 23, no. 2, pp. 1302–1341, Apr. 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3053464.
- [50] J. Loor *et al.*, “Evaluation of 5G Vehicle-to-Everything (V2X) Communications in Urban Scenarios,” *2024 IEEE Eighth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, pp. 1–6, Oct. 2024, doi: 10.1109/ETCM63562.2024.10746041.
- [51] G. Liu *et al.*, “Coverage Enhancement and Fundamental Performance of 5G: Analysis and Field Trial,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 6, pp. 126–131, Jun. 2019, doi: 10.1109/MCOM.2019.1800543.
- [52] C. V Murudkar and R. D. Gitlin, “Optimal-Capacity, Shortest Path Routing in Self-Organizing 5G Networks using Machine Learning”.
- [53] S. Kar, P. Mishra, and K. C. Wang, “Efficient resource management using 5G multi-connectivity for high throughput and reliable low latency communication,” *EURASIP J Wirel Commun Netw*, vol. 2025, no. 1, pp. 1–26, Dec. 2025, doi: 10.1186/S13638-025-02488-3/FIGURES/16.
- [54] D. Legislativo, *CONSTITUCIÓN DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR*, vol. 449, no. 20. 2021, pp. 25–2021. Accessed: May 31, 2025. [Online]. Available: https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf
- [55] *LEY ORGANICA DE TELECOMUNICACIONES*. Accessed: May 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/ley-organica-de-telecomunicaciones.pdf>
- [56] A. Xia *et al.*, “28 GHz MIMO Channel Capacity Analysis for 5G Wireless Communication Systems,” *2018 12th International Symposium on Antennas*,

Propagation and EM Theory, ISAPE 2018 - Proceedings, Jul. 2018, doi:
10.1109/ISAPE.2018.8634361.

CAPÍTULO VII

ANEXOS

Anexo 1 Diagrama de flujo del código



Anexo 2 Código de programación



Enlace del repositorio: <https://github.com/WilmerZL/Modelamiento-de-celdas/tree/c86d54e5c09e776cbc36ab8ec57ff6541a34ab12>

Anexo 3 Documento 3GPP TR 38.901 (Release 17)

Título completo: "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz"

Define los modelos UMa y RMa que se utilizó en las simulaciones

Enlace del documento:

https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.901/38901-h00.zip

Anexo 4 Documento 3GPP TS 38.211 (Release 17)

Título completo: "Physical channels and modulation"

Define numerología y espaciado de subportadoras

Enlace del documento:

https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.211/38211-h40.zip

Anexo 5 Documento 3GPP TS 38.104 (Release 17)

Título completo: "Base Station radio transmission and reception"

Define los valores para potencias de transmisión

Enlace del documento:

https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.104/38104-h40.zip